

Resumen

En este trabajo se abordará uno de los aspectos principales que afectan a la calidad del sistema de distribución eléctrico, el contenido armónico de la red.

La presencia de armónicos aumenta las pérdidas en la red y genera problemas en sus componentes, para evitarlos es importante predecir el contenido armónico de una red en función de las cargas conectadas.

Para ello, durante años se han desarrollado diferentes metodologías de cálculo y se han ido creando registros de aquellos consumos que inyectan contenido armónico en el sistema.

En este trabajo se hará uso de uno de esos registros y se empleará en la creación de una herramienta informática que permitirá calcular el contenido armónico de una red mediante el método de la penetración armónica.

El programa dará utilidad a los datos del registro y permitirá consultarlos. También permitirá personalizar los elementos y dimensión de la red a estudiar de forma cómoda dentro de unos límites.

Finalmente se presentará la programación temporal para la realización del proyecto así como su coste y su impacto ambiental.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	2
1. PREFACIO	5
1.1. Motivación.....	5
1.2. Origen del proyecto.....	5
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1. Objetivos del proyecto	7
2.2. Alcance del proyecto.....	7
3. ARMÓNICOS	8
3.1. Tipos de consumos.....	8
3.2. Contaminación armónica	9
3.2.1. Aproximación de Fourier.....	10
3.2.2. Tasas de distorsión.....	11
3.3. Efectos	12
4. MODELIZACIÓN DEL SISTEMA	14
4.1. Redes de alimentación	14
4.2. Líneas aéreas y cables	15
4.3. Transformadores.....	15
4.4. Consumidores.....	17
4.4.1. Consumos lineales (CL).....	18
4.4.2. Consumos no lineales (CNL)	18
4.5. Reducciones y pu	18

5. MÉTODO DE CÁLCULO	21
5.1. Penetración armónica	22
5.1.1. Nodos del sistema	22
5.1.2. Construcción de la matriz de admitancias Y	24
5.1.3. Construcción del vector de intensidades	24
5.1.4. Resolución	25
6. “EQUIPMENT HARMONIC DATABASE” (PANDA)	26
7. HERRAMIENTA INFORMÁTICA	28
7.1. Terminología	28
7.2. Directorios	29
7.3. Compatibilidad con PANDA	30
7.3.1. Ventana de consulta	32
7.4. Ventana principal	33
7.5. Guardado y carga	36
7.6. Definición de la red de alimentación	37
7.7. Definición de la red (elementos)	39
7.8. Definición de los consumidores	41
7.9. Proceso de cálculo y traza del programa	43
7.9.1. Variables	43
7.9.2. Trazas	46
7.10. Visor de resultados	51
7.11. Manual	52
7.11.1. Lanzar la ventana de definir elementos y actualización de iconos	52
7.11.2. Copiar la especificación de un elemento	53

7.11.3. Lanzar la ventana de definición de consumidores	53
7.11.4. Comportamiento de los botones del cuadro "Resetear"	54
7.11.5. Indicaciones sobre la parte inferior de la ventana de definir consumidores	55
8. EJEMPLO DE APLICACIÓN	56
8.1. Condiciones del ejemplo.....	56
8.1.1. Localización escogida.....	56
8.1.2. Consumidores.....	58
8.1.3. Elementos de la red	60
8.2. Resultados	61
9. ESTUDIO ECONÓMICO E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	64
9.1. Planificación temporal y evaluación económica	64
9.2. Impacto medioambiental del proyecto	65
CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
Referencias bibliográficas	68
AGRADECIMIENTOS	69

1. Prefacio

1.1. Motivación

En las últimas décadas están aumentando el número de dispositivos contaminantes conectados a la red y, con ello, ha crecido la preocupación por el estado y la calidad del sistema eléctrico con el objetivo de lograr un sistema más eficiente.

Esta contaminación se debe a que estos dispositivos (dispositivos con comportamiento no lineal, dispositivos basados en silicio, lámparas de descarga y inductancias saturables) consumen una corriente no sinusoidal y, cuando esta corriente pasa a través de los diferentes elementos de la red de distribución genera distorsiones en sus tensiones implicando un mal funcionamiento o un desgaste excesivo y puede llegar a inutilizarlos.

Numerosas publicaciones científicas han abordado el problema proponiendo modelizaciones de algunos de estos dispositivos [1] o proponiendo diferentes métodos de cálculo para poder predecir el comportamiento de la red al conectarle distintas cargas no lineales.

También hay institutos y universidades o departamentos de éstas dedicados al muestreo de diferentes cargas contaminantes para tener un registro que ayude a predecir el comportamiento de la red al conectarle las distintas cargas. Algunas de estas entidades trabajan en común ampliando la base de cargas “equiPment hArmoNic DAtabase” (PANDA) creada por la universidad técnica de Dresden, en Alemania.

Sería conveniente poder realizar una herramienta para el cálculo de la penetración armónica en redes de distribución que aprovechara de diferentes maneras la amplia información sobre las cargas no lineales que proporciona esta base de datos.

1.2. Origen del proyecto

El proyecto surge de una relación entre un participante en el proyecto de PANDA y el departamento de ingeniería eléctrica (EE) de la “Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona” (ETSEIB). En un primer momento se propone el desarrollo de una aplicación para la visualización de los registros de PANDA fuera de su página oficial.

Una vez conseguido esto, y con la finalidad de seguir ampliando el uso de los registros de PANDA fuera de su página oficial, se propone integrar la base de datos en algún programa que sirva para calcular el efecto de las cargas no lineales que figuren en PANDA sobre una red de distribución permitiendo definir diferentes configuraciones para esta red.

Para la forma de la red se toma como referencia el artículo publicado en Julio de 2009 en la revista del instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE) “Transactions on Power Delivery” [2]. En el artículo se presentan los problemas que generan las lámparas fluorescentes compactas (CFL) en la red eléctrica y se dan los resultados del estudio de una red cargada únicamente con lámparas de este tipo.

En un primer momento se pretende limitar las opciones de personalización del programa a que el usuario escoja, usando los registros de PANDA, las cargas no lineales (CNL) de los consumidores. Pero más tarde se decide permitir que todos los elementos de la red también sean personalizables. El único límite que se establece es el número total de elementos y de consumidores de la red, debido a limitaciones de hardware.

De esta manera se pretende dar la máxima versatilidad al programa y permitir que se adapte a una mayor cantidad de redes.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

El proyecto tiene por objetivo lograr una herramienta que permita estudiar el efecto de consumos no lineales sobre una red de distribución eléctrica dando la posibilidad de personalizar la forma de la red y sus elementos al mismo tiempo que el número y tipo de consumos no lineales aprovechando las medidas de la base de datos PANDA.

Para definir los consumos no lineales el programa facilitará el acceso a la base de datos de PANDA para consultarla y para usar sus registros en la definición de cada consumo no lineal de la forma que se crea más conveniente.

Para facilitar el uso del programa se creará una herramienta que permita guardar y cargar los mapas de la instalación que se hayan definido. Con todo esto se logrará un software que permitirá verificar de forma rápida el diseño de la red.

2.2. Alcance del proyecto

Con la elaboración del proyecto se pretende:

- Entender la naturaleza y propagación de la contaminación armónica a través de la red de distribución eléctrica.
- Modelar los elementos y consumidores de la red para ser capaces de simular su comportamiento bajo diferentes configuraciones y distribuciones de consumos no lineales.
- Generar una herramienta informática capaz de caracterizar completamente una red que suministre a un máximo de 800 consumidores, de simular el comportamiento de la red y de mostrar los resultados del cálculo, todo de manera rápida y cómoda.
- Integrar la base de cargas no lineales de PANDA dentro de la herramienta para consultarla y usarla en la definición de los diferentes consumos.
- Usar la herramienta creada para simular una red.

3. Armónicos

3.1. Tipos de consumos

Al conectar un dispositivo a la red éste puede consumir energía de dos maneras diferentes, dependiendo de qué dispositivo se trate:

- Consumos lineales: Dispositivos pasivos de impedancia constante, no saturables.
- Consumos no lineales: Dispositivos electrónicos con componentes basados en silicio, reactancias saturables y dispositivos que usan arcos de descarga para llevar a cabo la función para la que se diseñan (lámparas, soldadores, etc.)

Generalmente, en cualquiera de los dos casos las formas de onda de tensión y la corriente consumida por estos dispositivos son señales periódicas y, en particular para los consumos lineales siempre son señales sinusoidales.

En los consumos lineales la corriente que pasa a través de ellos es proporcional a la diferencia de voltaje aplicada. Esta relación se da a través de la impedancia del consumo Z , un valor constante que relaciona la corriente I y la diferencia de voltaje V de forma:

$$\underline{V} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Si se representan los valores de tensión (azul) y corriente (rojo) para este tipo de dispositivos se verá que las gráficas tienen la misma forma pero que existe un desfase y que sus amplitudes no son iguales. Si la tensión aplicada tiene forma sinusoidal y el módulo de la impedancia es mayor a uno, la corriente solicitada quedará de forma similar a la siguiente figura:

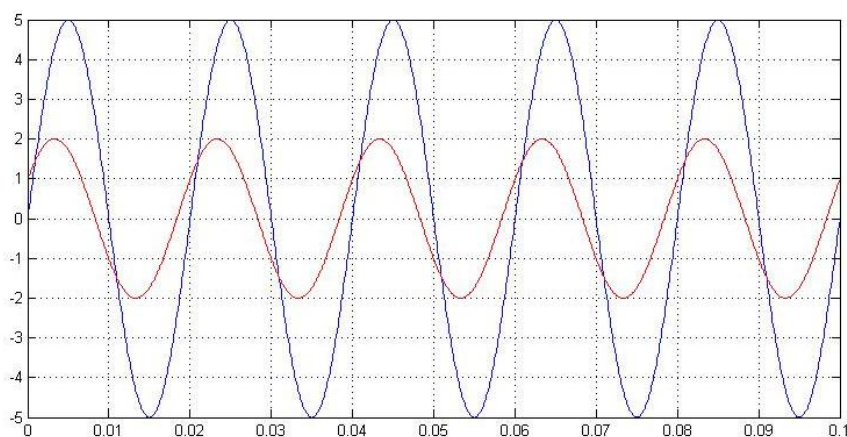


Fig. 4.1. Tensión e intensidad en una carga lineal.

Por otra parte se encuentran los consumos no lineales. Estos dispositivos contienen componentes que limitan el valor de corriente que circula por su interior o que exigen que la corriente tenga un comportamiento concreto.

Estas condiciones sobre la corriente que circula se imponen por la acción de componentes de silicio capaces de modificar el valor de su impedancia dependiendo de las condiciones en qué se encuentren. Algunos de los dispositivos no lineales con mayor incidencia en la red son los convertidores y ciertos tipos de lámparas. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la forma de onda de corriente de estos dispositivos cuando se lo somete a una tensión sinusoidal:

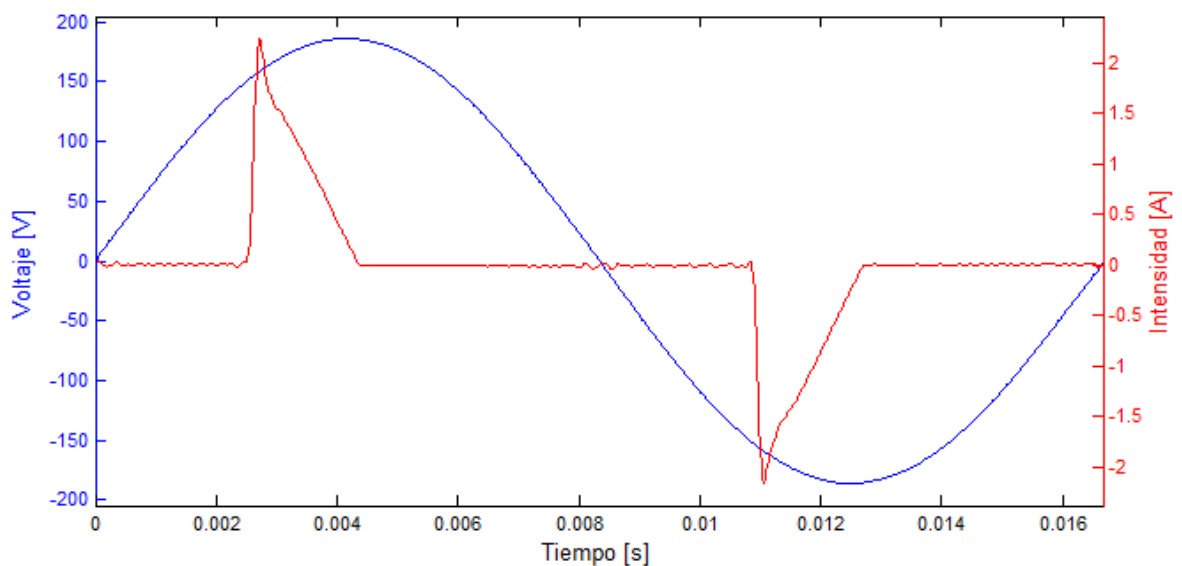


Fig. 4.2. Tensión e intensidad en una carga no lineal.

3.2. Contaminación armónica

Mediante el término “contaminación armónica” se hace referencia a la distorsión que presenta un señal periódico respecto a un señal sinusoidal con el mismo periodo y con una amplitud igual a la amplitud de la componente fundamental del señal distorsionado.

En redes eléctricas se da contaminación armónica en las tensiones del sistema cuando sus consumos solicitan corrientes no sinusoidales. Estas corrientes atraviesan los dispositivos pasivos que forman la red y dan lugar a tensiones con contenido armónico.

En la siguiente figura se muestra una señal con contenido armónico en rojo y su componente fundamental en azul:

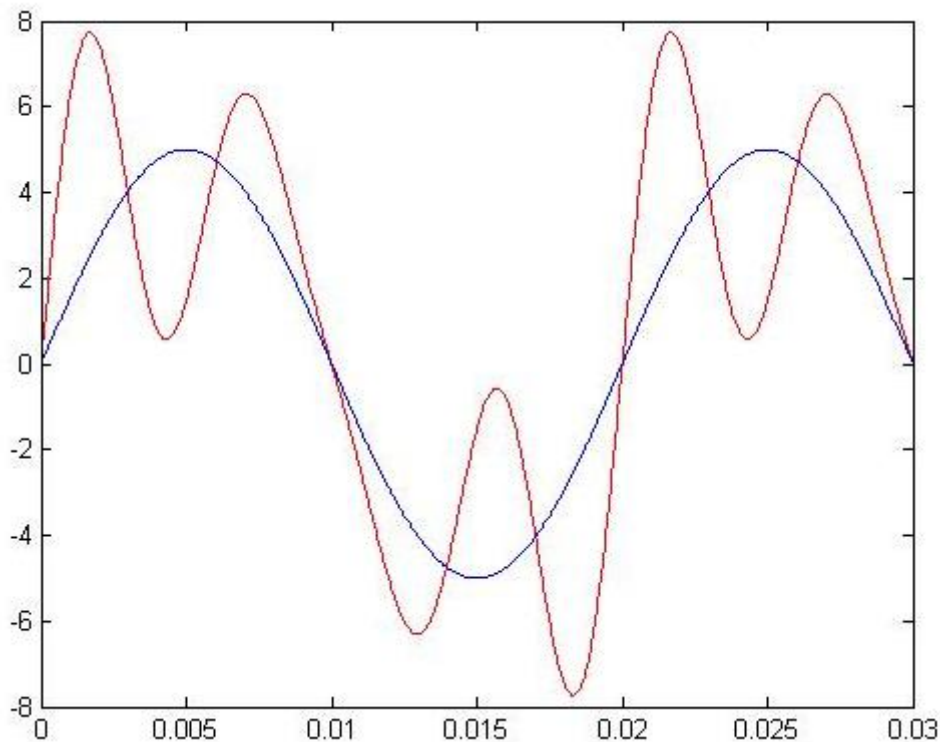


Fig. 4.3. Onda con contenido armónico y su componente fundamental.

Esta distorsión se da a través de toda la red y se acentúa más en el punto de conexión de la carga cuantas más impedancias hayan entre la fuente y la carga o cuanto mayor sea el valor de la impedancia equivalente de la red.

3.2.1. Aproximación de Fourier

Para poder expresar matemáticamente los valores de los señales periódicos distorsionados se utiliza una aproximación de éstos utilizando series de Fourier, de forma que una función $Y(t)$ se expresaría como [3]:

$$Y(t) = y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot y_k \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_k) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

O bien:

$$Y(t) = y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot y_k \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_k + \frac{\pi}{2}) \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde y_0 representa la parte continua de la función, f es la frecuencia fundamental a la que oscila $Y(t)$ y los coeficientes y_k son los valores eficaces de las ondas cuya frecuencia es k veces múltiple de la frecuencia fundamental (armónico de orden k), siendo k un número entero positivo.

Siguiendo con el ejemplo anterior, la señal con contenido armónico (en rojo) resulta de la suma de tres armónicos: el fundamental (en azul), el tercer armónico (en verde) y el cuarto (en amarillo); cada uno con una amplitud distinta.

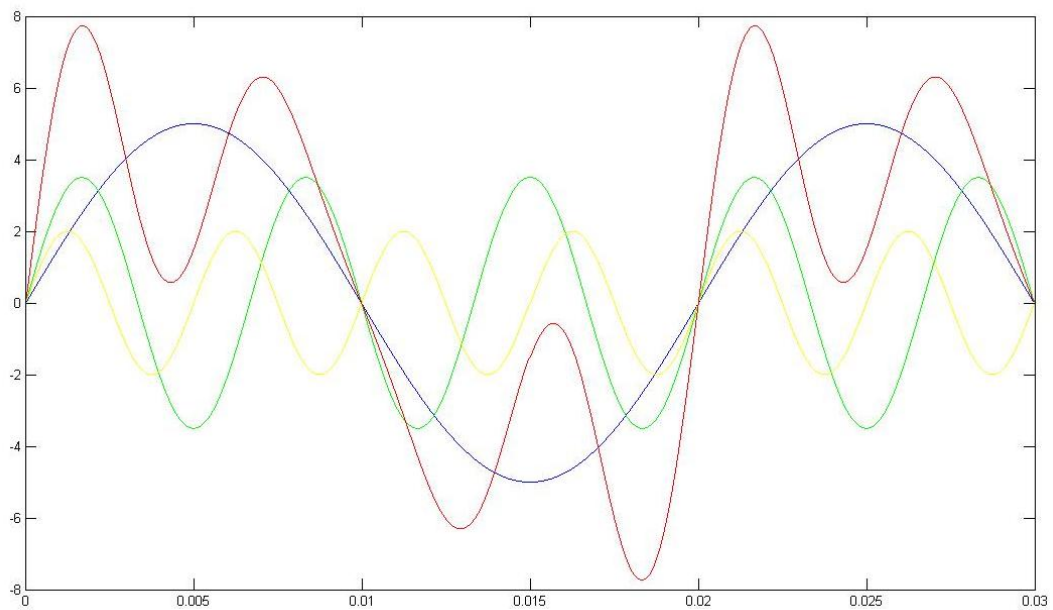


Fig. 4.4. Onda con contenido armónico y las componentes que la forman.

Generalmente los valores de tensión y corriente tratados presentarán simetría de semionda, es decir, cumplirán que $y(x+\pi) = -y(x)$. Esto hará que los valores eficaces de los armónicos pares sean cercanos a cero y, por ello, muchas veces sean despreciados.

Por otra parte, se observa que los armónicos con mayor capacidad para provocar distorsiones importantes son los armónicos de mayor orden ya que la impedancia de la línea es un número complejo cuya parte imaginaria aumenta, en valor absoluto, con cada orden de armónico. Sin embargo, estos armónicos suelen tener asociados unos valores eficaces muy bajos, lo que hace que acaben siendo más relevantes los armónicos de bajo orden (orden 3, 5, 7, 9, 11, etc.).

3.2.2. Tasas de distorsión

Para cualquier señal, se define la tasa de distorsión armónica (HD) de un armónico de orden

k como el cociente de amplitudes (A) o valores eficaces del armónico de orden k y el armónico fundamental:

$$HD_k(\%) = \frac{A_k}{A_1} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Por otra parte, se define la distorsión armónica total (THD) como:

$$THD(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} A_k^2}}{A_1} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} HD_k^2} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Estos valores se utilizan para caracterizar el contenido armónico de un señal concreto sea cual sea la naturaleza del señal (eléctrica, mecánica, radiada).

3.3. Efectos

Si las distorsiones producidas son lo suficientemente grandes pueden afectar gravemente a otros dispositivos conectados o a la propia red. Principalmente provocan mayores pérdidas por sobrecalentamiento del hierro y los bobinados de cobre pero también tienen otros efectos, algunos ejemplos son [4]:

- Generadores: Provocan pares pulsantes en el giro normal del generador, implicando una mayor carga mecánica sobre el eje en el momento en el que se producen.
- Transformadores: Provocan un efecto peculiar mayor, aumentan el ruido producido por el transformador y desgastan los aislamientos con más rapidez gracias al sobrecalentamiento mencionado antes. En el caso de los transformadores triángulo-estrella sucede que los armónicos de orden múltiplo a tres se quedan atrapados circulando dentro del terminal primario dando lugar a más sobrecalentamiento. Por otra parte, los transformadores con el neutro accesible serán más vulnerables ya que las corrientes no lineales no se anulan entre ellas al juntarse en el neutro sino que se suman, pudiendo provocar que el terminal se queme.
- Motores de inducción: Igual que en el caso anterior, se observa sobrecalentamiento en el hierro y en los bobinados de cobre y un efecto peculiar mayor tanto en el estátor como en el rotor. Los motores de inducción son más vulnerables al sobrecalentamiento ya que un aumento de 10°C respecto a su temperatura de trabajo provoca que la durabilidad del aislamiento se reduzca aproximadamente a la mitad. También, los

armónicos de secuencia inversa (orden $6n-1$ con n siendo un número entero positivo mayor a uno) pueden provocar pares pulsantes en el giro normal del rotor, aumentando puntualmente la carga mecánica sobre el eje.

- Cables: Por la interacción con otros cables se pueden manifestar dos efectos: el peculiar y el de proximidad. Estos dos efectos reducen la sección efectiva del cable ya que obligan a la corriente a circular por las zonas más externas. Mientras que para armónicos de bajo orden el efecto peculiar y el efecto de un cable sobre otro cercano son, generalmente, irrelevantes cuando se trata de armónicos de orden alto estos fenómenos se vuelven significativos y aumentan las pérdidas en el conductor. Además, para armónicos de orden elevado la resistencia del conductor aumenta, implicando más pérdidas por efecto Joule.
- Interruptores automáticos y Fusibles: Estos dispositivos se encargan de cortar el flujo eléctrico cuando detectan que circula una corriente con cierto valor medio cuadrático (rms). La presencia de corrientes no lineales hace que este rms sea más elevado que el valor con qué se había concebido la instalación, haciendo que los dispositivos corten el flujo de corriente antes.
- Lámparas y efecto flicker: La presencia de distorsiones en la red puede provocar que la intensidad lumínica de una lámpara fluctúe con un cierto periodo. Las lámparas más susceptibles son las incandescentes y los fluorescentes.

4. Modelización del sistema

Es necesario que los elementos de los circuitos se modelicen correctamente para que los cálculos realizados sean lo más fieles posibles a la realidad. Los elementos que se usarán en el programa y que, por tanto, será necesario modelizar son:

- Redes de alimentación
- Líneas aéreas y cables
- Transformadores
- Consumidores (Cargas lineales y no lineales en paralelo)

De entre los elementos enumerados anteriormente serán considerados como elementos contaminantes los consumos no lineales de cada consumidor, en cambio, el resto de elementos serán considerados no contaminantes. En este apartado se presentará el modelo usado para cada elemento.

4.1. Redes de alimentación

Se modelizarán con una fuente de voltaje y una reactancia conectadas en serie [5]. La fuente de voltaje tendrá voltaje nulo para armónicos de orden superior al fundamental y la reactancia aumentará su valor de forma proporcional al orden k del armónico de forma que:



Fig. 5.1. y Fig. 5.2. Esquemas bifilares de la red para la frecuencia fundamental (izquierda) y para los armónicos de orden superior (derecha).

$$\underline{Z}_k = jkX_{cc1} \quad (\text{Ec. 5.1}) \quad \text{¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.}$$

$$\text{¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. } X_{cc1} = \frac{U_N^2}{S_{cc}} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Donde U_N es la tensión nominal de la fuente y S_{cc} es su potencia de cortocircuito.

Alternativamente, su equivalente de Norton quedaría como [5]:

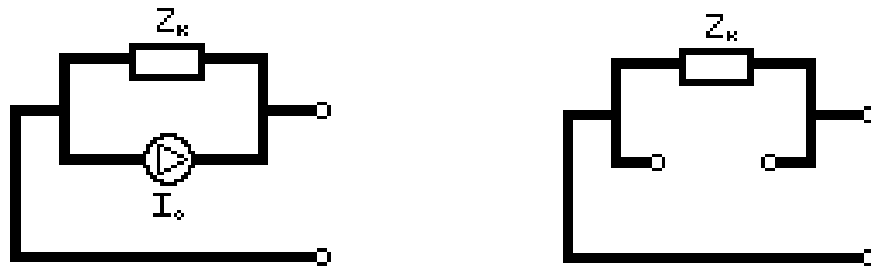


Fig. 5.3. y Fig. 5.4. Esquemas bifilares de los equivalentes de Norton de la red para la frecuencia fundamental (izquierda) y para los armónicos de orden superior (derecha).

$$\underline{I}_0 = \frac{U_N}{jX_{cc1}} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

4.2. Líneas aéreas y cables

Las líneas se caracterizarán con su esquema en π de parámetros concentrados con una resistencia nula para sus tramos transversales de forma que [6]:

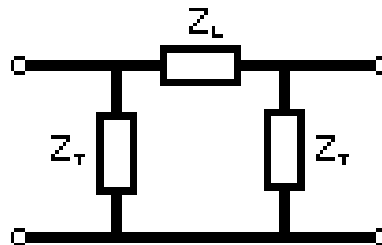


Fig. 5.5. Esquema bifilar en π de parámetros concentrados.

$$\underline{Z}_L(k) = R + j \cdot k \cdot X_L = R + j \cdot k \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (\text{Ec. 5.4})$$

origen de la referencia.

$$\underline{Z}_T(k) = \frac{-j}{k \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

origen de la referencia

4.3. Transformadores

Los transformadores se han modelizado usando su impedancia equivalente de cortocircuito

(Z_{cc}) afectada por el orden del armónico correspondiente. En este caso se ha decidido no considerar la rama magnetizante [6 y 7].

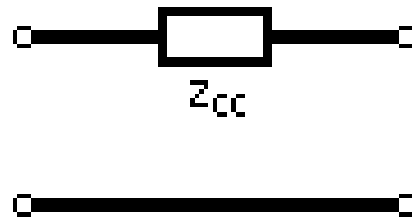


Fig. 5.6. Esquema bifilar del transformador.

Debido a que los transformadores de tipo triángulo-estrella impiden el paso de los armónicos de orden múltiplo de 3, para estos armónicos su modelo cambiará a [6 y 7]:

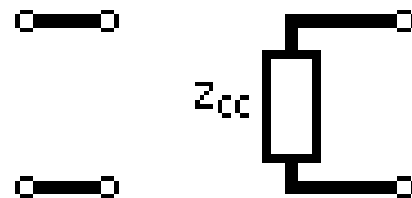


Fig. 5.7. Esquema bifilar del transformador triángulo-estrella para armónicos de orden múltiplo de tres.

En la base de pu del transformador la impedancia reducida (z') se calcularía de la siguiente manera:

$$\underline{z}' = r + jx \quad ; \quad (\text{Ec. 5.6}) \quad \text{iError! No se encuentra el origen de la referencia.} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

$$\text{referencia. } r = \frac{W_{cc}}{S_N} \quad x = \sqrt{\|\underline{z}'\|^2 - r^2} = \sqrt{\varepsilon_{cc}^2 - r^2} = \sqrt{U_{cc}^2 - r^2} \quad \text{iError! No se encuentra el origen de la referencia.} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

encuentra el origen de la referencia.

Debido a que no todos los catálogos de transformadores consultados ofrecían datos sobre los parámetros ε_{cc} y W_{cc} de los modelos, se ha optado por dejar el valor de r en función del valor de x . Para establecer esta relación se han tomado los valores de ε_{cc} y W_{cc} de un catálogo de transformadores de 0,1 a 3 MW [8] y se ha calculado el parámetro medio de proporcionalidad (α) para cada uno de los tres niveles de tensión que figuran en el catálogo:

Nivel de tensión	17.5 kV	24 kV	36 kV
α	4.876	5.257	5.7327

Tabla. 5.1. Valores medios de α .

Existe una relación entre la potencia nominal del transformador y el parámetro α de forma que cuanto mayor sea la potencia nominal del transformador mayor será su parámetro α . Para tener en cuenta transformadores de más potencia nominal se dará un valor de 8 a α . De esta forma:

$$8r = x \quad ; \quad \underline{Z} = r + j8r \quad \text{(Ec. 5.10)}$$

de la referencia.

$$8r = \sqrt{\|\underline{Z}'\|^2 - r^2} = \sqrt{\mathcal{E}_{cc}^2 - r^2} \quad \text{(Ec. 5.11)}$$

4.4. Consumidores

Los consumidores se han modelizado según lo estipulado en el estudio mencionado en el apartado 2.2 de este trabajo [2]. Se modelizará un consumidor como una carga lineal situada en paralelo con la suma de las cargas no lineales que le sean asignadas, representadas como una fuente de corriente.

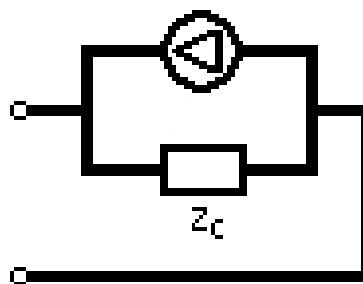


Fig. 5.8. Esquema bifilar del consumidor.

4.4.1. Consumos lineales (CL)

La carga lineal se modelizará como una impedancia (Z_c) soportando un voltaje de 400V (tensión de línea) y usando los valores de potencia activa trifásica (P) y factor de potencia (fdp) definidos para el consumidor de forma que:

$$\underline{Z}_c = \frac{400^2}{\underline{S}_c^*} \quad \text{Error! No se encuentra el origen de la referencia.} \quad (\text{Ec. 5.12})$$

$$\underline{S}_c = P + j \frac{P}{fdp} \sin(\cos^{-1}(fdp)) \quad \text{Error! No se encuentra el origen de la referencia.} \quad (\text{Ec. 5.13})$$

4.4.2. Consumos no lineales (CNL)

Las cargas no lineales se modelizarán como fuentes de corriente con contenido armónico y se representarán dentro de la herramienta informática con el símbolo de un tiristor.

Como PANDA proporciona la amplitud (A) y la fase (θ) de cada armónico (k) la intensidad de orden k (I_k) correspondiente a un dispositivo se calculará como:

$$\underline{I}_k = A_k \cdot (\cos(\theta_k) + j \sin(\theta_k)) \quad (\text{Ec. 5.14})$$

4.5. Reducciones y pu

Para realizar el cálculo será necesario reducir todos los valores (tensiones, corrientes e impedancias) a una base de trabajo común [7]. Si se da el siguiente esquema:

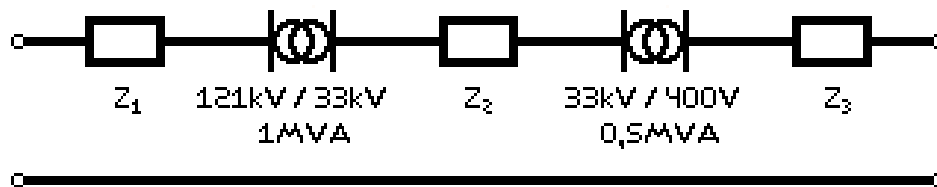


Fig. 5.9. Transformadores e impedancias en serie.

Se escogerán como tensiones base:

$$U_{b1} = 121 \text{ kV}$$

$$U_{b2} = 33 \text{ kV}$$

$$U_{b3} = 400 \text{ V}$$

Siendo M la cantidad de transformadores, como potencia base se escogerá un valor (2MVA) que cumpla la relación:

$$S_b \geq \sum_{i=1}^M S_{N,i} \quad (\text{Ec. 5.15})$$

De esta forma, los valores reducidos de los elementos colocados entre los transformadores se calcularán como:

$$u_i = \frac{U_i}{U_{bi}} \quad (\text{Ec. 5.16})$$

referencia.

;

$$i_i = \frac{I_i}{I_{bi}} \quad (\text{Ec. 5.17})$$

origen de la referencia.

$$Z_i = \frac{Z_i}{Z_{bi}} \quad (\text{Ec. 5.18})$$

Para los subíndices $i = 1, 2, 3, \dots$ y siendo que:

$$I_{bi} = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_{bi}} \quad (\text{Ec. 5.19})$$

referencia.

;

origen de la

$$\text{referencia. } Z_{bi} = \frac{U_{bi}^2}{S_b}$$

En el caso de los transformadores será necesario cambiar de base la impedancia calculada en el apartado 5.3. Para ello, si U_1 es la tensión nominal del primario, U_2 la del secundario, z' la impedancia del transformador en pu y S_N la potencia nominal del transformador se hará el cambio de base de forma que la impedancia reducida z_r se exprese como:

$$\underline{z}_r = \underline{z}' \cdot \frac{U_j^2}{S_N} \cdot \frac{S_b}{U_{bi}^2} \quad (\text{Ec. 5.21})$$

Con j siendo 1 o 2 en función del terminal del transformador donde se quiera situar la impedancia e i tomando distintos valores en función del tramo del esquema que le corresponda. Como U_{bi} y U_j , generalmente, se escogerán para que tengan el mismo valor:

$$\underline{z}_r = \underline{z}' \cdot \frac{S_b}{S_N} \quad (\text{Ec. 5.22})$$

Una vez realizado el cálculo, para obtener el valor real, hará falta deshacer la reducción usando los valores base escogidos anteriormente.

5. Método de cálculo

Tal como se ha comentado, en los últimos años ha crecido el interés por la obtención de las tensiones de la red a las frecuencias fundamental y armónicas debido al aumento en el número de cargas contaminantes conectadas al sistema. Esto ha hecho que se reformule el flujo de cargas tradicional para incorporar las tensiones armónicas y los parámetros que definen el comportamiento de cada consumo no lineal tal como se explica en la bibliografía [9].

Las técnicas para el análisis del flujo armónico de cargas se clasifican en aquellas que lo hacen desde el dominio del tiempo y aquellas que lo hacen desde el dominio de la frecuencia. Las que pertenecen al primer grupo se basan en la resolución de las ecuaciones diferenciales del sistema mediante integración numérica, lo que implica un esfuerzo en el cálculo muy grande. Las del segundo grupo extienden la formulación tradicional del flujo de cargas incluyendo el tratamiento de los dispositivos no lineales y las tensiones armónicas.

Debido a la complejidad del problema por la posibilidad de la aparición de asimetrías en el sistema por la transposición de las líneas de transmisión y las cargas junto al complejo comportamiento de los consumos no lineales ha llevado a considerar los desequilibrios de la red para formular un flujo de cargas más realista.

Estas formulaciones suelen dejar los consumos de las cargas no lineales como incógnitas en función de la tensión en el punto de conexión de la carga. Debido a esto, los métodos de resolución usados se basan en suponer un valor inicial para los contenidos armónicos que inyectan los dispositivos e ir modificando estos valores iterativamente hasta que las ecuaciones recursivas del método llegan a una solución. Como otros métodos iterativos, sistema de ecuaciones puede tener diferentes soluciones y la solución obtenida puede depender del punto de partida escogido. Entonces, para encontrar la solución del caso estudiado será necesario realizar ciertas metodologías a parte del cálculo iterativo.

La formulación más simple del flujo armónico de cargas corresponde a la penetración armónica. En esta formulación se toma la hipótesis de que los dispositivos no lineales no tienen un comportamiento distinto por el hecho de soportar tensiones con contenido armónico. Al asumir esta hipótesis la potencia en un nudo del sistema queda definida únicamente por la tensión y la intensidad fundamentales en ese nudo.

Una vez se ha caracterizado el estado del sistema, junto con los dispositivos no lineales, las tensiones armónicas pueden ser calculadas mediante el método de los nudos a partir de la matriz de admitancias que caracteriza el conjunto red-cargas pasivas y de la inyección de las intensidades armónicas de los dispositivos no lineales.

Esta formulación permite abordar el problema armónico de manera sencilla pero el hecho de no considerar la sensibilidad de los consumos a las tensiones armónicas genera una sobreestimación de la contaminación armónica de la red. Por este hecho se recomienda aplicar la formulación cuando se prevea que la distorsión armónica será reducida.

En este trabajo se utilizarán los datos de la base de PANDA para caracterizar el comportamiento armónico de los dispositivos no lineales y, por lo tanto, no será necesario plantear ninguna ecuación para este cometido.

5.1. Penetración armónica

Como se ha dicho, el método de la penetración armónica consiste en resolver la red bajo la hipótesis de que los dispositivos no lineales no cambian su comportamiento al estar bajo tensiones con contenido armónico y tampoco interactúan entre ellos. Se caracterizará el sistema y se resolverán sus ecuaciones para cada orden armónico. Es decir, si se estudia la red para 50 órdenes de armónico lo que se hace es estudiar 50 redes, una por cada orden de armónico, con la misma distribución pero con las impedancias y corrientes correspondientes al armónico tratado.

5.1.1. Nodos del sistema

El método requiere definir ciertos puntos (nodos) sobre el esquema del sistema que se identificarán usando números. En concreto:

- Requiere un nodo 0 de referencia que se tomará allí donde se encuentre la tensión más baja del sistema.
- Un nudo por cada embarrado o unión de dos o más ramificaciones
- Dos nudos por cada fuente de corriente o de tensión, un nudo en cada extremo.
- Dos nudos por cada impedancia que presente acoplamiento magnético, uno en cada extremo.

Aplicando esto al sistema y definiendo dos nudos adicionales para no tener que hacer la impedancia equivalente entre dos elementos se tiene:

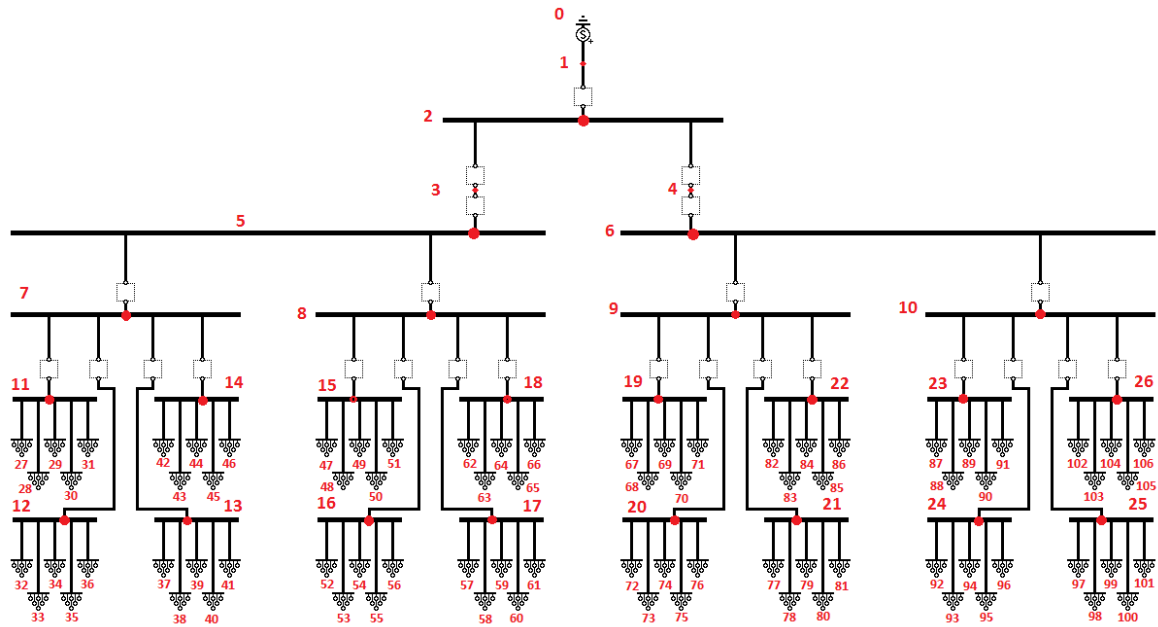


Fig. 6.1. Esquema fase-neutro del sistema con sus nodos numerados.

El orden seguido para la numeración ha sido el mismo que el orden de escritura: de izquierda a derecha y de arriba a abajo. En caso de que no se utilice alguna rama del esquema los nodos de esa rama se eliminan y se vuelve a numerar todo siguiendo el mismo orden.

Para los nodos terminales, representados por los iconos de racimos, se tomarían de la forma mostrada por la imagen inferior de manera que, por ejemplo, para el racimo entre los números 11 y 27 el nodo 11 correspondería con #0, el nodo 27 con #1 y los #2 usarían los números del 107 al 116, ambos incluidos. Para el racimo entre los números 11 y 28 el nodo 11 correspondería al #0, el nodo 28 al #1 y los #2 usarían los números del 117 al 126 y así hasta tener un sistema con 906 nodos en total.

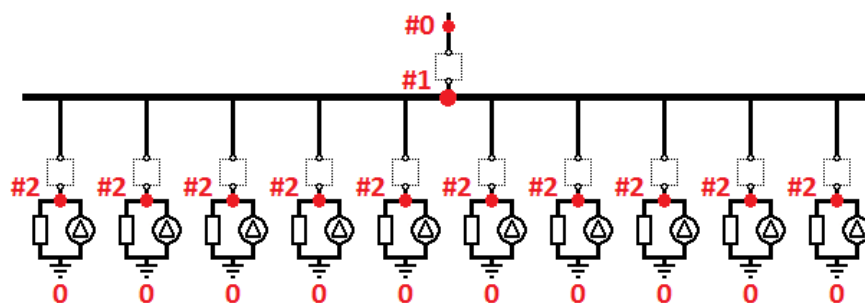


Fig. 6.2. Esquema fase-neutro de uno de los últimos embarrados.

5.1.2. Construcción de la matriz de admitancias \underline{Y}

La matriz de admitancias (\underline{Y}) es una matriz cuadrada y simétrica de dimensión igual al número de nodos del sistema, sin contar el nodo 0.

Para construirla será necesario tener en cuenta la numeración de los nodos de cada elemento y el valor y posición de las admitancias con las que se modela el elemento para el armónico que se esté tratando.

Los elementos de la diagonal ($\underline{Y}_{i,i}$) de la matriz se obtendrán mediante la suma de todas aquellas admitancias (\underline{Y}) que tengan uno de sus extremos conectados al nodo i . Los elementos que no sean de la diagonal ($\underline{Y}_{i,j}$) se obtendrán cambiando de signo la suma de las admitancias que tengan sus extremos conectados a los nodos i y j simultáneamente. Siendo N el número de nodos del sistema y M el número de admitancias conectadas simultáneamente a los nodos i y j :

$$\underline{y}_{i,i} = \sum_{j=1}^N (\underline{y}_{i,j} + \underline{y}_{j,i}) \quad (\text{Ec. 6.1})$$

$$\underline{y}_{i,j} = \underline{y}_{j,i} = (-1) \cdot \sum_{a=1}^M \underline{y}_{i,j_a} \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Los valores de admitancias utilizados se calcularán como el inverso de la impedancia reducida correspondiente:

$$\underline{y} = \underline{z}^{-1} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

5.1.3. Construcción del vector de intensidades

Debido a la modelización de los consumos, en el vector de intensidades aparecerá la intensidad suministrada por la red de alimentación y las introducidas por los consumos no lineales según sus modelos explicados en el apartado 5.

En el caso del primer armónico la intensidad de la red de alimentación será diferente de cero pero en los armónicos de orden superior será nula, por tanto, los únicos elementos que podrán presentar intensidades no nulas para armónicos de orden superior serán los consumos.

Igual que con la matriz de admitancias, para cada armónico se construirá un vector de

intensidades distinto usando los valores de intensidad reducidos según lo explicado en el apartado 5.5.

5.1.4. Resolución

El sistema de ecuaciones del sistema viene determinado mediante la expresión:

$$Y \cdot U = I \quad (\text{Ec. 6.4})$$

Aislado el vector de tensiones se tiene que éste es igual al producto de la matriz de admitancias invertida y el vector de intensidades.

$$U = Y^{-1} \cdot I \quad (\text{Ec. 6.5})$$

Será necesario resolver este producto tantas veces como armónicos se hayan considerado. Las tensiones obtenidas estarán expresadas en pu y, en el caso de querer expresarlas como valores sin reducir, será necesario multiplicar cada una por la tensión base que le corresponda al nodo.

Si se quiere conocer la intensidad que circula por una impedancia será necesario dividir la diferencia de potencial de los terminales de la impedancia entre el valor de ésta ($Z_{i,j}$), tal que:

$$\underline{I}_{i,j} = \frac{\underline{V}_j - \underline{V}_i}{\underline{Z}_{i,j}} \quad (\text{Ec. 6.6})$$

De forma que se obtendrá un valor de intensidad reducido si tanto la diferencia de tensión como $Z_{i,j}$ son valores reducidos. Y si ninguno de los dos valores está reducido se obtendrá un valor de intensidad no reducido.

6. “equiPment hArmoNic DAtabase” (PANDA)



Fig. 7.1. Logotipo de PANDA.

El proyecto de PANDA nace en la universidad técnica de Dresden, en Alemania con la voluntad de crear una plataforma de ámbito global en la que diferentes laboratorios puedan intercambiar los registros de emisión armónica de diferentes dispositivos domésticos.

Pretende ser una ayuda para aquellos investigadores cuyos estudios necesiten conocer el contenido armónico de ciertos dispositivos. Así, los investigadores no se verían obligados a invertir tiempo en registrar la emisión armónica de sus dispositivos, sino que se les ofrecen los datos ya registrados de los dispositivos que necesitan, almacenados mediante los estándares de PANDA.

El 29 de enero la base de PANDA constaba de 4490 registros y ha seguido creciendo desde entonces. Para acceder a estos registros se debe estar registrado como laboratorio colaborador y entrar mediante su página web. Desde ésta se pueden consultar los diferentes archivos de la base de datos o bajarlos como un archivo de texto.

- Para bajar uno o varios archivos es necesario pulsar el enlace “Download” de la parte izquierda de la pantalla. Después el visitante puede bajar los archivos uno a uno pulsando en el icono de disquete correspondiente de la parte derecha de la pantalla o puede seleccionar varios archivos y pulsar el botón “download” situado debajo de la lista de archivos. Encima de la lista de archivos se encuentran diferentes opciones de búsqueda por si el visitante está interesado en los registros de un dispositivo con características concretas.

Technische Universität Dresden

equipment harmonic Database

Logout About Support guest | you are logged in as: user => 1337 | lab => 1337 | user logged in => 1

Test points of: All labs

Categories: All Categories

Rated power: All

Supply type: All

THDi: All

search reset search

TP-ID	Description	Category	Subcategory	Power	Supply	Year	Country	Lab
<input checked="" type="checkbox"/> 3072	CFL 15W NO DIMMABLE (CCH-001 SUPL1-1: 1.6 MSamples/s)	Lighting	Compact fluorescent lamp	15	2	2010	CH	IEEH
<input type="checkbox"/> 3073	CFL 15W NO DIMMABLE (CCH-001 SUPL1-1: 0.1 MSamples/s)	Lighting	Compact fluorescent lamp	15	2	2010	CH	IEEH
<input type="checkbox"/> 3074	CFL 15W NO DIMMABLE (CCH-001 SUPL1-2)	Lighting	Compact fluorescent lamp	15	2	2010	CH	IEEH
<input type="checkbox"/> 3078	CFL 15W NO DIMMABLE (CCH-001 SUPL1-7)	Lighting	Compact fluorescent lamp	15	3	2010	CH	IEEH
<input type="checkbox"/> 3453	LED 7W DIMMABLE (LGB-003 SUPL1-1: 1.6 MSamples/s)	Lighting	Integrated Solid State Lamp	7	2	2011	GB	IEEH
<input type="checkbox"/> 4195	DESKTOP DC SOURCE MEASURED WITH A DC LOAD OF 150W RATED POWER 520W (NDE-046 SUPL1-1: 1.6 MSamples/s)	Computer and Communication	Desktop	520	2	2009	DE	IEEH
<input type="checkbox"/> 3824	Smartphone Measurement when the battery was discharged (NDE-006 SUPL1-1: 1.6 MSamples/s)	Computer and Communication	Mobile devices	NA	2	2009	DE	IEEH
<input type="checkbox"/> 5877	Charging with max. current (16 A)	Electric Vehicles	Electric car with onboard rectifier	3600	2	2013	DE	IEEH
<input type="checkbox"/> 5878	Charging with max. current (16 A) flat-top waveform	Electric Vehicles	Electric car with onboard rectifier	3600	3	2013	DE	IEEH
<input type="checkbox"/> 5879	Charging with max. current (16 A) pointed-top waveform	Electric Vehicles	Electric car with onboard rectifier	3600	3	2013	DE	IEEH

download 10 25 50 100 all 1

Fig. 7.2. Catálogo de dispositivos para descargar.

- Para consultar los datos de un dispositivo es necesario pulsar sobre el enlace “view” de la parte izquierda de la pantalla. Se cargará una pantalla similar a la vista anteriormente pero en este caso si se pulsa sobre algún identificador (ID) de los de la lista la ventana del explorador mostrará las formas de onda y los espectros armónicos del dispositivo y diferentes datos de éste.

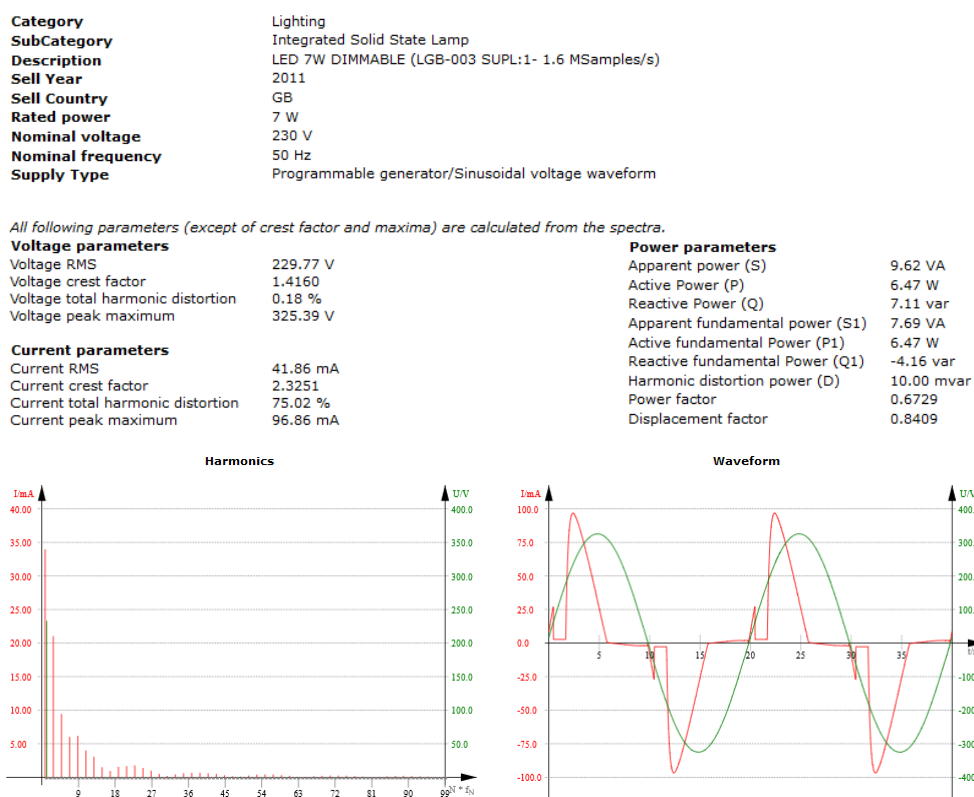


Fig. 7.3. Datos de un dispositivo.

7. Herramienta informática

Se ha desarrollado la herramienta usando el programa Matlab como plataforma ya que permite ejecutar operaciones con matrices y contiene una amplia colección de funciones matemáticas predefinidas y disponibles para el usuario. Además permite la escritura de código enfocado a objetos e incorpora un asistente para la creación de interfases gráficas.

En este apartado se hará una introducción a la terminología usada para hablar sobre la codificación mediante Matlab. Seguidamente, se explicarán todas las particularidades del programa desde el punto de vista de la codificación y comportamiento de éste. Para ello se abordará cada ventana del programa por separado y, finalmente, se adjuntará un manual de uso del programa con indicaciones sobre aspectos concretos de éste.

7.1. Terminología

- String: Cadena de caracteres que contienen cualquier tipo de información, numérica o no numérica.
- Operación matemática: Sumas, productos, potencias, determinantes, etc.
- Operación lógica: Relaciones comparativas entre dos números o dos strings que dan como resultado el valor lógico 0 si la relación no se cumple, o el valor lógico 1 si la relación se cumple. Matlab codifica internamente estos dos valores lógicos igual que los números 0 y 1, respectivamente, así que es posible escribir una operación matemática en la que intervenga el resultado de una operación lógica.
- Matriz: Estructura que almacena únicamente números en sus distintas posiciones y que puede ser usada tanto en operaciones matemáticas como en operaciones lógicas. Para acceder a sus elementos los índices deben ir dentro de paréntesis "(" y ")".
- Vector: Matriz de una fila y varias columnas o, alternativamente, de varias filas y una columna.
- Celda: Estructura capaz de almacenar cualquier tipo de información en sus distintas posiciones pero que no puede ser usada en ningún tipo de operación. Para acceder a sus elementos los índices deben ir dentro de llaves "{" y "}".
- Índices: Números enteros positivos utilizados para acceder a una posición concreta de una matriz o celda.
- Función: Bloque de código que necesita ser llamado desde el programa en curso o



desde el código de otra función para que pueda ejecutarse. Si una función llama a otra, hasta que la segunda función no termina de ejecutarse no se puede reanudar el código de la primera función. Puede tener variables de entrada y variables de salida.

- Bucle: Trozo de código encabezado por la sentencia “while (condición)” que se ejecuta una y otra vez hasta que se deja de cumplir la condición.
- Iteración: Trozo de código encabezado por la sentencia “for variable = vector” que se ejecuta tantas veces como elementos tenga el vector y en el cual la variable va tomando los valores de los elementos del vector uno a uno, un valor para cada vez que se ejecuta el código.
- “Nesting” o nidificación: Acción de encapsular una celda dentro de otra o de escribir un trozo de código dentro de otro del mismo tipo como una iteración dentro de otra, un bucle dentro de otro o una función dentro de otra.

7.2. Directorios

Debido a que, como se verá, el programa hace uso de múltiples archivos de texto (.txt) y otros tantos propios de Matlab (archivos con extensión .m y .fig) son necesarios varios directorios, o carpetas:

- Carpeta “Raíz” o “Root”: Es la carpeta principal del programa, se le puede dar cualquier nombre y puede colocarse en cualquier directorio del ordenador. Almacena las tres carpetas que se mencionarán a continuación, todos los archivos del programa con extensión .m y .fig, una versión de esta memoria para su consulta dentro del programa y un archivo .txt (Elementos.txt) con datos de diferentes elementos.
- Carpeta “PANDA”: Carpeta donde situar todos los archivos .txt bajados de la base de datos de PANDA. Se pueden crear tantas subcarpetas como se quieran dentro de ésta y los archivos se pueden colocar dentro de cualquiera de ellas.
- Carpeta “mapas”: Carpeta donde el programa almacena los mapas definidos por el usuario cuando se ordena su guardado. A diferencia de la anterior, no admite la creación de subcarpetas y los mapas guardados no se reconocerán si se mueven a otra localización.
- Carpeta “símbolos”: Carpeta donde se almacenan todas las imágenes usadas para los iconos y los fondos de pantalla de las diferentes ventanas del programa. Renombrar, sustituir o mover alguna de las imágenes dentro de esta carpeta puede generar fallos en la ejecución del programa. Tampoco admite la creación de subcarpetas.

7.3. Compatibilidad con PANDA

Se han descargado de la base de datos de PANDA los datos muestreados de tensión e intensidad así como las amplitudes y fases de cada armónico para cada dispositivo y se han almacenado en distintos archivos .txt, uno para cada dispositivo, siguiendo la siguiente estructura:

Línea	Información
1	Identificador del dispositivo
2	En blanco
3	Texto: "[User detail]"
4	Identificador del laboratorio
5	Identificador del usuario
6	En blanco
7	Texto: "[EUT]"
8	Categoría
9	Subcategoría
10	País
11	Año de comercialización
12	Potencia nominal (W)
13	Frecuencia nominal (Hz)
14	Tensión nominal (V)
15	"Supply source"
16	Descripción

17	En blanco
18	Texto: “[Harmonics]”
19	Armónicos de corriente
20	Armónicos de voltaje
21	Texto: “[Waveforms]”
22	Frecuencia de muestreo
23	Muestras de corriente
24	Muestras de voltaje
25	En blanco

Tabla 8.1. Líneas e información contenida.

En algunos casos no se han registrado muestras de los valores de corriente ni de voltaje. Cuando esto sucede el archivo .txt del dispositivo tiene las 20 primeras líneas de la tabla, además de una línea 21 en blanco.

Para gestionar eficientemente los datos descargados se ha diseñado un algoritmo de exploración que encuentra todos aquellos archivos .txt de PANDA que almacenados dentro de la carpeta llamada “PANDA” o en otras carpetas dentro de ésta y los almacena internamente según su categoría y su subcategoría.

Las categorías y subcategorías de los dispositivos de la base de PANDA son:

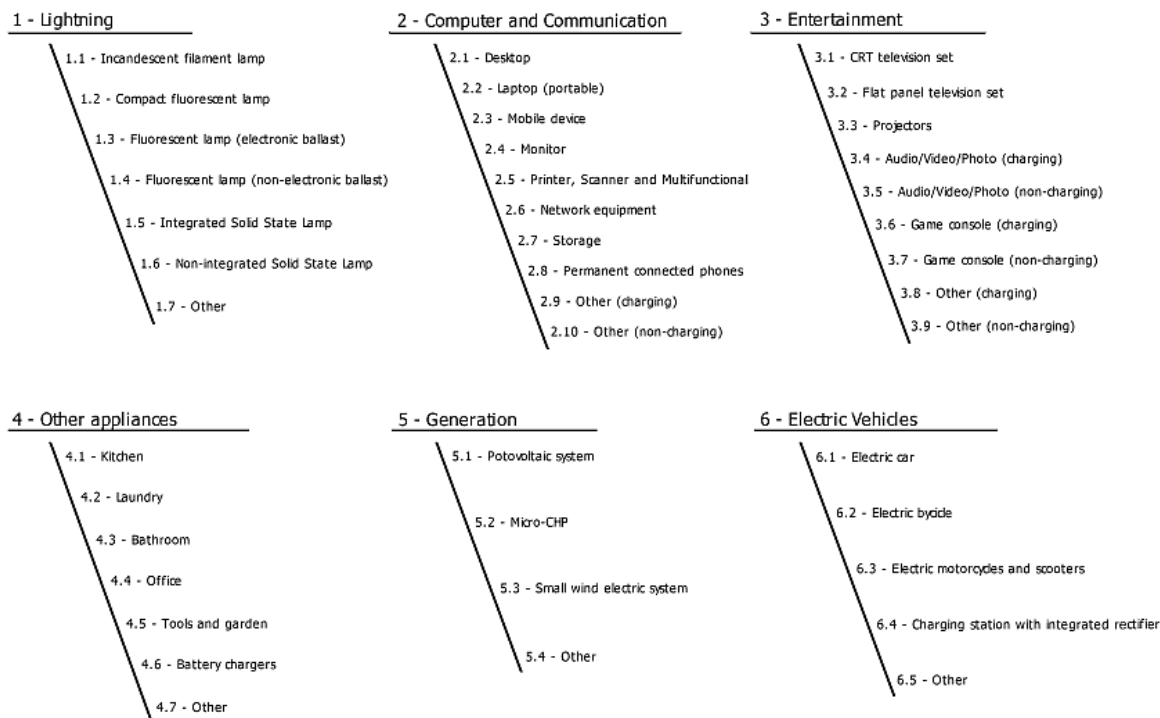


Fig. 8.1. Conjunto de categorías y subcategorías de PANDA.

7.3.1. Ventana de consulta

Además de usar los datos de PANDA en el cálculo de la red se ha implementado una ventana para consultar la base de datos y poder visualizar las formas de onda de tensión y corriente, así como el contenido armónico que inyectan a la red.

Mediante los desplegables de la parte derecha es posible seleccionar dos dispositivos distintos y alternar la visualización de uno u otro mediante los botones “Ver carga 1” y “Ver Carga 2”.

Por otro lado, el grupo de botones “V”, “I” y “V y I” sirven para escoger qué datos se mostrarán, respectivamente, si se mostrarán los de tensión, los de corriente o una superposición de ambos. Igualmente, la pareja de botones “Fourier” y “Muestras” permiten indicar al programa si se desea que la forma de onda mostrada provenga de un desarrollo de Fourier usando senos y los valores de amplitud y fase del documento .txt o de los valores muestreados.

Cada grupo o pareja de botones mencionado anteriormente funciona como un conmutador de tres o dos posiciones, según el caso, de forma que en un mismo instante solo puede permanecer pulsado uno de los botones del grupo.

Por último, la lupa de la esquina superior derecha de cada gráfica permite visualizar la gráfica en otra ventana diferente, con más opciones para examinar las gráficas.

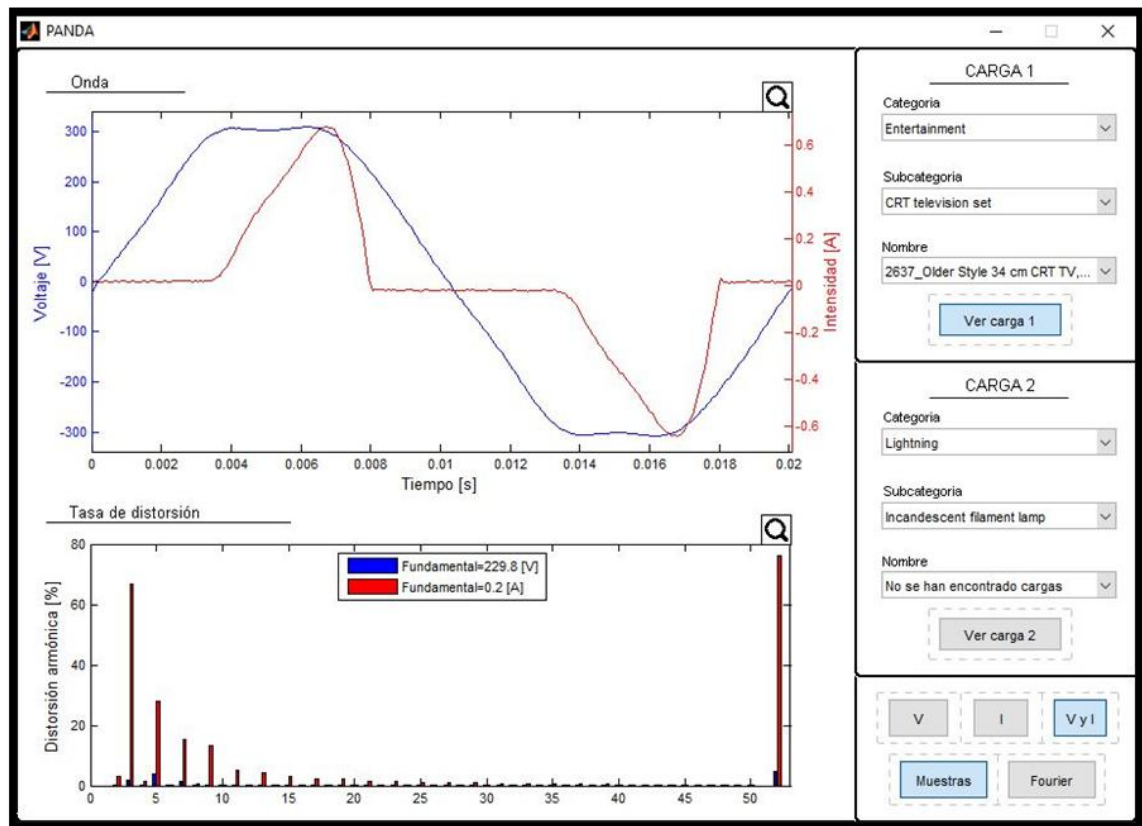


Fig. 8.2. Ventana de consulta.

7.4. Ventana principal

Es la primera ventana mostrada al ejecutar el programa. En ella se muestra un mapa de la red, una barra de menús y seis botones ordenados en dos grupos de tres, uno en la esquina superior izquierda que sirve para la definición de la red y otro en la esquina superior derecha que sirve para ejecutar el cálculo y visualizar los resultados.

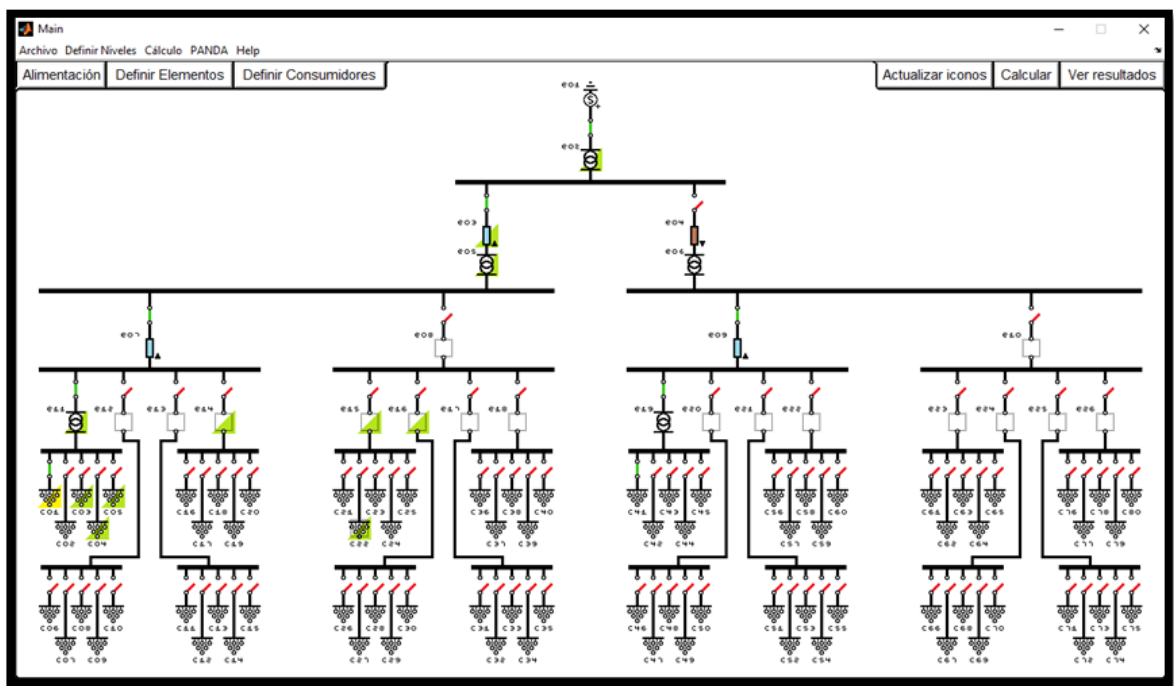


Fig. 8.3. Ventana principal.

Para implementar el método de cálculo escogido era necesario adaptar la dimensión de la red a las capacidades técnicas del ordenador, tanto por capacidad de procesamiento como por el tamaño máximo de la ventana. Se ha decidido mantener la cantidad de embarrados entre la red de alimentación y el consumidor [2] y, para maximizar el número de consumidores, se han escogido un número distinto de ramificaciones por embarrado. Las ramificaciones de cada embarrado según la cantidad de embarrados que lo separan de la fuente serían las siguientes:

Embarrados hasta la fuente	0	1	2	3	4	Número de consumidores
Ramificaciones	2	2	4	5	10	800

Tabla 8.2.Número de ramificaciones y número de consumidores.

Las últimas 10 ramificaciones no pueden verse desde la ventana principal para no hacer la ventana aún más grande. Es necesario lanzar la ventana asociada al botón “Definir consumidores” para ver el final del mapa de la red.

Para referirse a distintas partes del mapa desde otras ventanas del programa se ha codificado cada icono mediante la letra “e” seguida de un dígito de dos cifras si el icono representa un elemento de la red y con la letra “c” seguida de dos cifras si el icono

representa un grupo de consumidores.

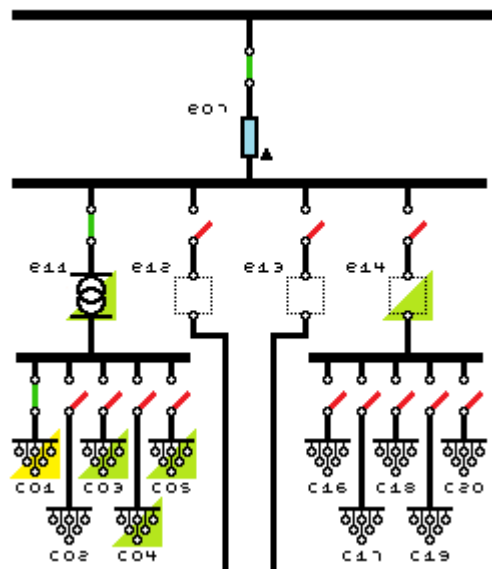


Fig. 8.4. Codificaciones

La barra de menús sirve como mecanismo alternativo para comunicarse con el programa pero en ella también se encuentran algunas instrucciones que solo pueden darse usando esta barra como el guardado y carga del mapa de la instalación, el borrado completo del mapa en uso (todo dentro de la pestaña “Archivo”), la consulta de esta memoria mediante la pestaña “Help” y la consulta de la base de PANDA y de las categorías que la componen mediante dos opciones distintas dentro de la pestaña “PANDA”.

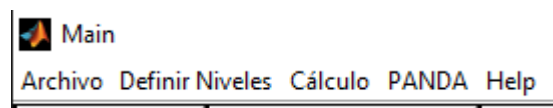


Fig. 8.5. Barra de menús

Para acabar, es necesario mencionar que de los dos grupos de tres botones mencionados al principio de este punto, el único botón que no lanza una ventana es el botón “Actualizar iconos”. Este botón permite actualizar las imágenes de todos los iconos del mapa. Se recomienda pulsarlo cada vez que se cargue un mapa o después de especificar los datos de un elemento o de un grupo de consumidores.

El botón es necesario ya que como las acciones mencionadas anteriormente se llevan a cabo desde otras ventanas diferentes a la principal no es posible realizar cambios sobre una ventana con un código que se ejecuta al hacer una acción en otra ventana diferente.

7.5. Guardado y carga

La ventana de guardado se lanza desde la barra de menús de la ventana principal usando la pestaña “Archivo” y la opción “Guardar mapa”, como se muestra en la imagen inferior.

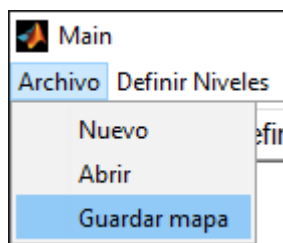


Fig. 8.6. Menú “Archivo”

Se trata de una ventana pequeña con una lista en la que se enumeran todos los mapas guardados dentro de la carpeta “mapas” además de la opción “Nuevo mapa”.

Si se pulsa sobre esta opción se da la posibilidad de dar nombre al mapa mediante una casilla de texto editable situada entre la lista y el botón “Guardar mapa”. Si el nombre escogido coincide con el nombre de un mapa de la lista, al pulsar el botón “Guardar mapa” se sobrescribirán los datos de ese mapa.

Si, por el contrario, se pulsa sobre el nombre de un mapa guardado con anterioridad y después se pulsa el botón “Guardar mapa” se sobrescribirán los datos de ese mapa.

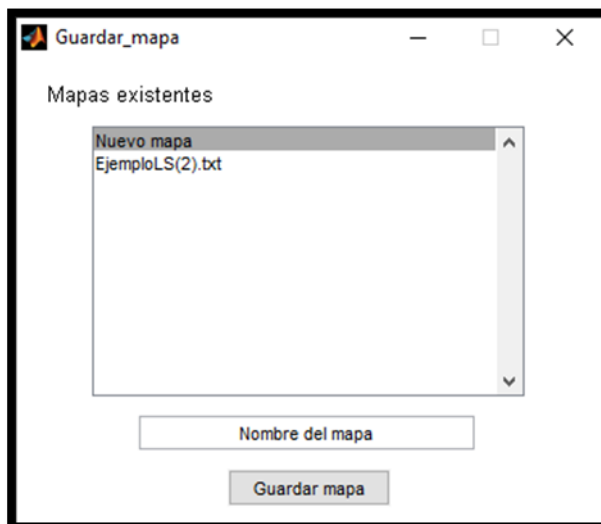


Fig. 8.7. Ventana de guardado

De manera similar, la ventana de carga también se lanza desde la barra de menús de la ventana principal pero usando la pestaña “Archivo” y la opción “Abrir”. Se trata de una

ventana un poco más grande que consta de una lista igual que la de la ventana de guardado pero sin la opción “Nuevo mapa”.

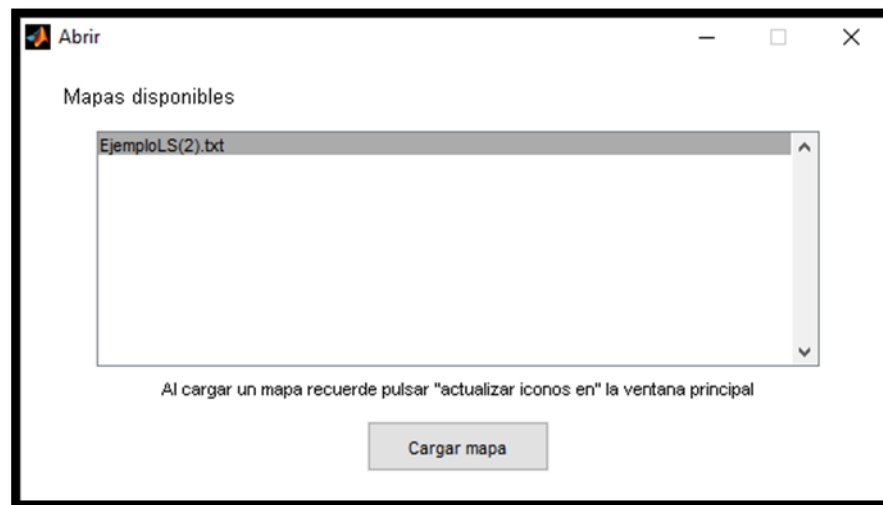


Fig. 8.8. Ventana de carga

Es necesario seleccionar uno de los mapas de la lista y, después, pulsar el botón “Cargar mapa”.

Cuando se hayan cargado los datos del mapa aparecerá otra ventana mostrando un aviso para recordar que es necesario pulsar el botón “Actualizar iconos” en la ventana principal con tal de cambiar las imágenes de los iconos. Este aviso se cerrará a si mismo al cabo de unos 5 segundos.

Respecto a la opción “Nuevo” dentro de la pestaña “archivo”, sirve para eliminar todas las especificaciones de elementos y consumidores que estén en uso por el programa. Antes de hacer esta puesta a cero de las especificaciones se muestra una ventana con un mensaje informativo junto a un botón para confirmar la acción.

7.6. Definición de la red de alimentación

Esta ventana se puede lanzar desde la ventana principal pulsando el botón “Alimentación” o usando la barra de menús, la pestaña “Definir niveles” y la opción “Alimentación”.

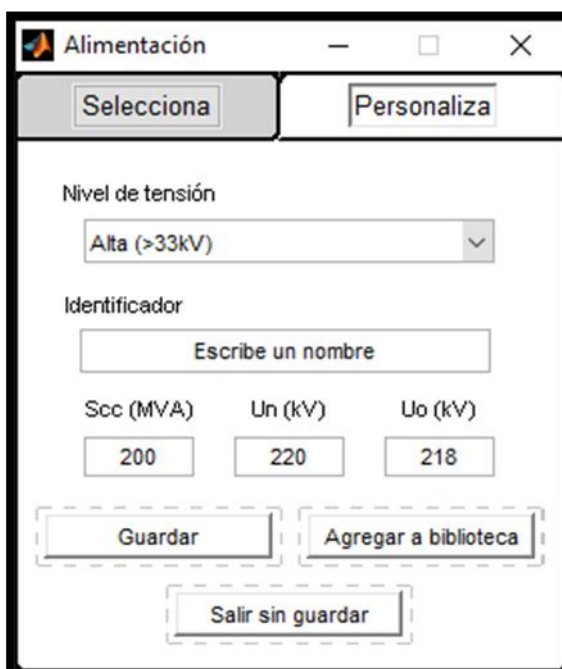
Por una parte, teniendo pulsado el botón “Selecciona”, la ventana permite escoger una de las redes de alimentación disponibles en la biblioteca de elementos usando los dos desplegables.



The screenshot shows a software window titled 'Alimentación' with two tabs: 'Selecciona' and 'Personaliza'. The 'Personaliza' tab is active. It features a 'Nivel de tensión' dropdown menu set to 'Alta (>33kV)'. Below it is a 'Disponibles' dropdown menu showing 'Alimentación 220kV (220kV) 200MVA'. There are three input fields for 'Scc (MVA)' (200), 'Un (kV)' (220), and 'Uo (kV)' (218). At the bottom, there are three buttons: 'Guardar', 'Salir sin guardar', and a dashed box containing another 'Salir sin guardar' button.

Fig. 8.9. Comportamiento 1.

Por otra, al tener pulsado el botón "Personaliza", el segundo desplegable pasa a ser un cuadro de texto editable y se permite modificar los valores de S_{cc} , U_n y U_o para poder usar una alimentación que no haya sido cargada previamente en la biblioteca de elementos.



This screenshot shows the same 'Alimentación' window in 'Personaliza' mode. In addition to the fields seen in Fig. 8.9, there is now an 'Identificador' section with a text input field containing the placeholder 'Escribe un nombre'. The 'Scc (MVA)', 'Un (kV)', and 'Uo (kV)' fields remain the same. The buttons at the bottom are 'Guardar', 'Agregar a biblioteca' (replacing the previous 'Salir sin guardar' button), and 'Salir sin guardar'.

Fig. 8.10. Comportamiento 2.

7.7. Definición de la red (elementos)

Esta ventana se puede lanzar desde la ventana principal o la ventana de definición de consumidores si se ha seleccionado uno o más elementos y se pulsa el botón “Definir elementos”. Alternativamente, puede lanzarse desde la pestaña “Definir niveles” de la barra de menús de la ventana principal, usando cualquiera de sus opciones excepto la de “Alimentación” o la de “Consumidores”. Para más información sobre como lanzar la ventana y otros detalles consulte el apartado 7.11.

El desplegable de la parte superior de la pantalla permite escoger si la ventana actuará sobre todos los elementos que estaban seleccionados al lanzar la ventana o sobre uno de ellos. Como se verá más adelante, esto permite visualizar y especificar las características de cada elemento sin tener que cerrar y volver a lanzar la ventana una y otra vez..

Los botones “Actual”, “Cambiar parámetros” y “Definir nuevo” actúan como un conmutador de tres posiciones, de forma que solo puede estar activado uno de los tres y cada uno permite usar la ventana de una forma diferente:

- “Actual”: Cuando está activo la ventana sirve únicamente para visualizar la especificación dada al elemento (elemento activo) seleccionado en el desplegable de la parte superior de la pantalla. Si no se ha dado ninguna especificación para el elemento activo los textos de la pantalla muestra el texto “Sin definir” o se muestran en blanco. Si el elemento activo es la opción “Todos” la pantalla muestra si hay características compartidas por todos los elementos o si son diferentes.

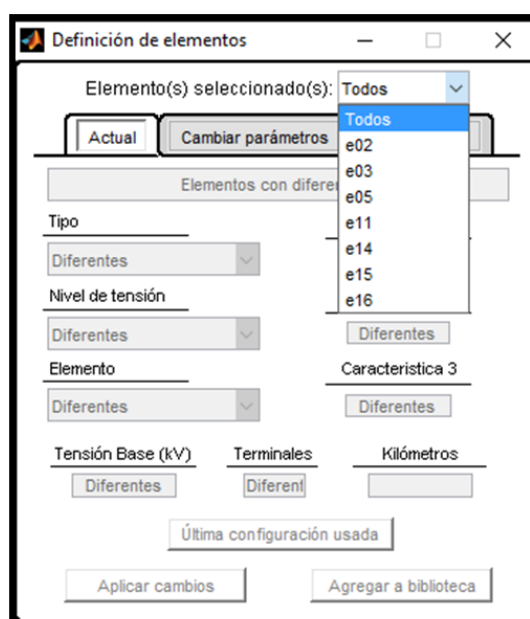


Fig. 8.11. Comportamiento 1.

- “Cambiar parámetros”: Cuando está activo permite cambiar las especificaciones asignadas al elemento activo mediante los tres desplegables del centro de la pantalla. Los cambios se hacen usando elementos que estén en la biblioteca de elementos.

Definición de elementos

Elemento(s) seleccionado(s): Todos

Actual Cambiar parámetros Definir nuevo

Transformador dY 220kV-33kV 100MVA 10%

Tipo	Sn (MVA)	
Transformador	100	
Nivel de tensión	ecc (%)	
Alto (>33kV)	10	
Elemento	Un1/Un2	
Transformador dY 22...	220/33	
Tensión Base (kV)	Terminales	Kilómetros
220	dY	

Última configuración usada

Aplicar cambios Agregar a biblioteca

Fig. 8.12. Comportamiento 2.

- “Definir nuevo”: Cuando está activo permite especificar las características de un elemento que no estuviera previamente en la biblioteca de elementos y usarlo para caracterizar el elemento activo o, simplemente, agregarlo a la biblioteca para usarlo más tarde.

Definición de elementos

Elemento(s) seleccionado(s): Todos

Actual Cambiar parámetros Definir nuevo

Transformador dY 220kV-33kV 100MVA 10%

Tipo	Sn (MVA)	
Transformador	100	
Nivel de tensión	ecc (%)	
Alto (>33kV)	10	
Elemento	Un1/Un2	
Transformador dY 22...	220/33	
Tensión Base (kV)	Terminales	Kilómetros
220	dY	

Última configuración usada

Aplicar cambios Agregar a biblioteca

Fig. 8.13. Comportamiento 3.

Si el desplegable de tipo de elemento muestra como seleccionada la opción “Cable aéreo” o la opción “Cable subterráneo”, antes de pulsar el botón “Aplicar cambios” es necesario que se introduzca un valor numérico en los cuadros de texto correspondientes a “Tensión Base” y a “Kilómetros”. Si se muestra como seleccionada cualquier otra opción solamente hace falta introducir un valor numérico en el cuadro de texto correspondiente a “Tensión Base”.

Tanto en esta ventana como en la del apartado anterior, si al pulsar el botón “Aplicar cambios” o el botón “Agregar a biblioteca” no se han especificado todas las características necesarias no se ejecutará la acción del botón y se lanzará una ventana informando de las características que faltan por especificar. Esta ventana informativa se cerrará automáticamente cuando hayan transcurrido unos cinco segundos.

7.8. Definición de los consumidores

Para lanzar esta ventana es necesario haber seleccionado uno o más grupos de consumidores en la ventana principal y después pulsar el botón “Definir consumidores”. También se puede lanzar usando la pestaña “Definir niveles”, en la barra de menús, y pulsando sobre la opción “Consumidores”.

En la ventana se muestra un mapa más pequeño que consta de un embarrado del que salen las últimas diez ramificaciones mencionadas en el apartado 7.4 y debajo de éste se encuentra un conjunto de botones, desplegables y textos editables para poder especificar las cargas lineales y no lineales que supone cada consumidor. En la pantalla, los iconos etiquetados con una e minúscula seguida de una letra mayúscula de la a a la j identifican a los elementos de cada rama. De igual manera, se identificará a los consumidores mediante una C mayúscula seguida de un guión y la misma letra mayúscula que el icono inmediatamente superior.

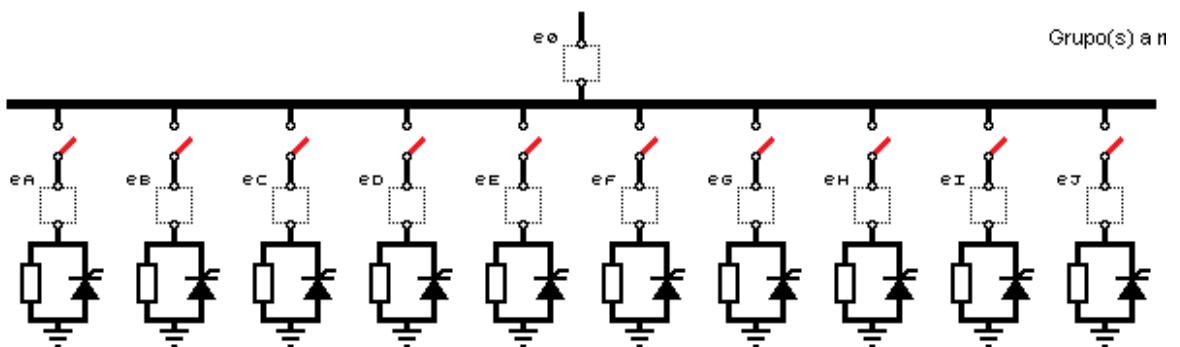


Fig. 8.14. Embarrado con diez consumidores.

En la esquina superior derecha hay un desplegable con la misma función que el que

encabezaba la ventana de definición de elementos del apartado anterior. Debajo de éste se incluyen los botones “Definir elementos” y “Actualizar iconos”, que tienen las mismas funciones que sus homónimos de la ventana principal.

Dentro del marco “Resetear” se encuentran tres botones, cada uno de ellos encargado de la puesta a cero de un aspecto del mapa a su izquierda. Para conocer su funcionamiento detallado consulte el apartado 7.11.

Los botones “Lineales” y “No lineales” funcionan como un conmutador de dos posiciones y controlan la parte inferior de la pantalla. Es decir, cuando el botón “Lineales” es el que está activo en la parte inferior se muestran todos los botones y textos editables necesarios para caracterizar las cargas lineales de los consumidores del grupo activo (el grupo seleccionado en el desplegable de la esquina superior derecha). Sucede lo mismo con el botón “No lineales” y la caracterización de las cargas no lineales. El aspecto de la pantalla con el botón “Lineales” activo es el siguiente:

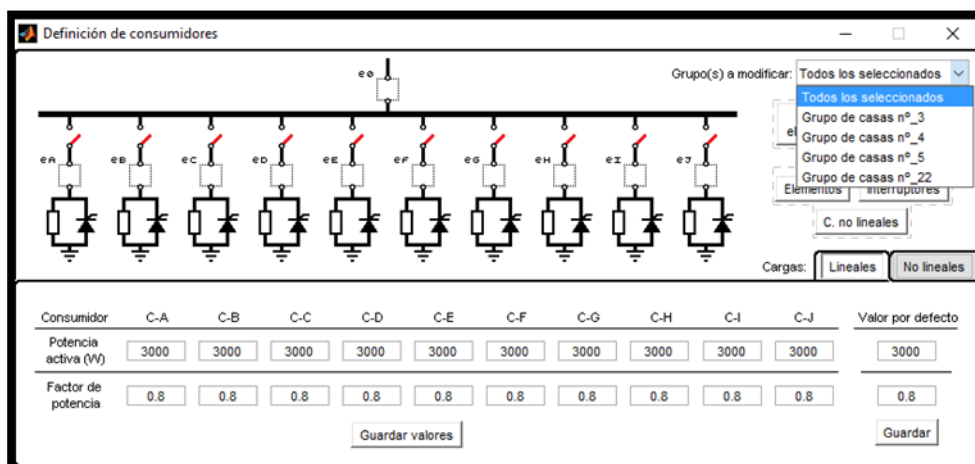


Fig. 8.15. Definición de las cargas lineales

Y el aspecto cuando está activo el botón “No lineales” es:

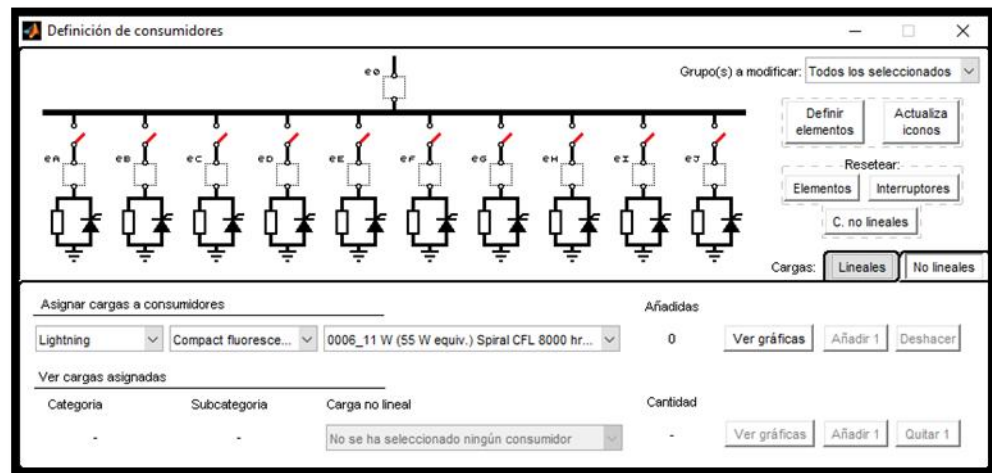


Fig. 8.16. Definición de las cargas no lineales.

En este último caso, el desplegable y los botones de la parte más baja de la pantalla solo pueden funcionar cuando se ha seleccionado el icono de una o más cargas no lineales (tiristores). Para una explicación más detallada consulte el punto 7.11.

7.9. Proceso de cálculo y traza del programa

En este apartado se mencionarán las variables usadas por distintas ventanas de la herramienta y cómo son tratadas a lo largo de la manipulación del programa.

7.9.1. Variables

Se clasificarán las variables según su uso de forma que encontraremos variables que almacenan datos del mapa, variables que permiten cierta comunicación entre ventanas, variables que almacenan valores que intervienen en el cálculo o que provienen de éste y variables usadas para almacenar las gráficas. El primer grupo de variables pertenecen a la penúltima categoría:

- “Pbase”: Valor escogido para S_b .
- “Pcons”: Valor genérico para la potencia activa de los consumidores.
- “fdp”: Valor genérico para el factor de potencia de los consumidores.
- “last_armo”: Valor que indica la cantidad de armónicos a calcular.

El siguiente grupo son variables que almacenan datos del mapa:

- “multiplicadores”: Vector que contiene los valores de la cantidad de ramificaciones por

embarrado mencionados en el apartado 7.4. Para el programa es como si hubiera un embarrado justo después de cada uno de los elementos, incluyendo la red de alimentación como elemento, sabiendo esto el vector usado es [1,2,1,2,4,5,10].

- “numeración”: Celda de dimensión $N \times 3$ creada a partir de “multiplicadores”, siendo N la cantidad de valores de “multiplicadores” más uno. Si se nombran los valores de una fila como A,B y C, ésta contiene el número mínimo (B) y el número máximo (C) que le corresponden a los nodos del mapa que hacen que haya A elementos entre el nodo y la red de alimentación.
- “habilitados”: Matriz de dimensión igual al número de nodos del sistema. Codifica el estado de cada elemento con el valor lógico 1 en la posición marcada por los nodos del elemento si el interruptor asociado al elemento está cerrado o con el valor lógico 0 si está abierto. Solo se usa el triángulo inferior de la matriz.
- “estado_interr”: Matriz simétrica de dimensión igual al número de nodos del sistema. Codifica el estado de cada elemento con el valor 1 en la posición marcada por los nodos del elemento si el interruptor asociado al elemento está cerrado o con el valor -1 si está abierto. Si no existe ningún elemento que conecte los nodos asociados a una posición de la matriz, esta posición toma el valor 0. Esta matriz se utiliza para encontrar el segundo nodo de un elemento conociendo el primer nodo tanto si el elemento tiene su interruptor cerrado o abierto mientras que la matriz anterior se utiliza para encontrar más rápido los elementos con su interruptor cerrado.
- “panda”: Celda nidificada dos veces para contener, de manera ordenada, la dirección de cada archivo de la base de PANDA de la forma que se explicará el punto 7.9.2.
- “catalogo_elementos”: Celda de dimensión 1×3 . En la primera posición contiene otra celda de dimensión $1 \times M$, M siendo mayor o igual a la cantidad de líneas del archivo “Elementos.txt”, y que contiene en cada una de sus posiciones el identificador de un elemento definido en el archivo anterior. En la segunda posición hay otra celda de dimensión $M \times 1$ que contiene el conjunto de características de cada elemento para cada posición. En la tercera y última posición se encuentra una matriz de dimensión $M \times 3$ que codifica cada elemento según su tipo, su nivel de tensión y el resto de elementos con el mismo tipo y nivel de tensión.
- “elementos” : Celda simétrica de dimensión igual a la cantidad de nodos del sistema. Las posiciones de la diagonal se usan para especificar los valores de las cargas lineales diferentes a los definidos mediante “Pcons” y “fdp” y el resto de posiciones a_{ij} especifican la caracterización usada en el elemento que conecta los nodos i y j . La posición a_{ij} contiene, a su vez, una celda de números de dimensión 1×3 en la que el

primer número va de 1 a M y identifica el elemento del catálogo usado en la especificación, el segundo número corresponde a los kilómetros si el elemento es una línea y el tercer número corresponde a el valor de tensión base asociado al elemento.

- “casas” : Celda de una columna y tantas filas como nodos hayan en el sistema. Las posiciones terminales, a partir de la 106 en el ejemplo, contienen las cargas no lineales asignadas al consumidor que conecta al sistema mediante el nodo numerado según la posición. Las cargas no lineales se organizan en otra celda de dos columnas y tantas filas como diferentes cargas tenga el consumidor de forma que la primera columna contiene el nombre de la carga y la segunda contiene, dentro de otra celda 1x2, el camino al archivo de la carga y el número de cargas iguales.

Las siguientes cinco posibilitan la comunicación entre ventanas:

- “toggle_elementos” : Vector que codifica los iconos de elementos seleccionados (icono en verde) con el valor lógico 1.
- “toggle_casas” : Vector que codifica los iconos de los grupos de consumidores seleccionados (icono en verde) con el valor lógico 1.
- “elemento” : Celda generada a partir de la variable “toggle_elementos” que contiene en cada posición la numeración de los dos nodos de uno de los iconos seleccionados.
- “cluster” : Celda generada a partir de la variable “toggle_casas” que contiene en cada posición la numeración de los dos nodos que identifican uno de los grupos de consumidores seleccionados.
- “carga_panda” : Vector de tres posiciones usado para lanzar la ventana de consulta de la base de PANDA. Si las tres posiciones tienen valor distinto de cero la ventana se lanza con la carga correspondiente ya seleccionada en los desplegables bajo el título “CARGA 1”.

El siguiente grupo corresponde a variables creadas durante el cálculo y que, en su mayoría, se usan más tarde en la ventana de consulta de resultados.

- “Matrices” : Celda de seis posiciones que almacena una matriz de dimensión menor o igual al número de nodos del sistema en cada una de las seis posiciones. Las matrices contienen los datos de la impedancia reducida de cada elemento ocupando la posición que tendrá más tarde en la matriz de cálculo. Dos de las matrices contienen los valores reales de las impedancias, otras dos matrices contienen los valores fundamentales de las reactancias y las últimas dos contienen los valores fundamentales imaginarios de la impedancia de los condensadores. Las matrices van en parejas debido a que, como se

ha comentado en apartados anteriores, hay elementos que cambian su modelo dependiendo del orden del armónico que se esté tratando.

- “Admixarmo”: Celda de una fila y tantas columnas como marque la variable “last_armo” que contiene las matrices de admitancias calculadas para cada uno de los armónicos.
- “No_lineales”: Matriz de tantas filas como la dimensión de la matriz de admitancias y tantas columnas como marque la variable “last_armo”. Cada columna se corresponde con un armónico distinto y contiene el vector de intensidades introducidas en la red por los elementos modelados con fuentes de corriente.
- “Correspondencias”: Celda simétrica de dimensión menor o igual al número de nodos del sistema, que almacena las posiciones en la matriz de admitancias de cada uno de los elementos del mapa que estén conectados a la red de alimentación.
- “tensiones_nodales”: Matriz con tantas columnas y filas como “No_lineales” que almacena las tensiones calculadas para cada armónico, columna por columna.

Y, por último, las variables usadas dentro de las ventanas con gráficas:

- “sets_p”: Celda de dimensión 2x4 asociada con la ventana de consulta de PANDA que almacena las gráficas de las dos cargas seleccionadas con los desplegables bajo los títulos “CARGA 1” y “CARGA 2”. La primera fila corresponde con la carga 1 y la segunda con la carga 2 de forma que al cambiar la carga seleccionada se borran los datos almacenados hasta el momento. Se utiliza esta celda para dar más velocidad a la ventana en caso de ir alternando la visualización entre las gráficas de las cargas seleccionadas.
- “sets_r”: Celda de dimensión 1x4 con el mismo propósito que la variable anterior pero para la ventana de consulta de resultados. Los datos de la variable se borran cada vez que cambia el elemento activo.
- “toggles_grafs”: Matriz de dimensión 3x4 que almacena los estados de los botones que controlan las gráficas mostradas en las pantallas de consulta de PANDA y consulta de resultados.

7.9.2. Traza

En este apartado se detallará la evolución de cada variable así como las secuencias de acciones que tienen lugar a nivel de código mientras se ejecuta el programa. En la imagen inferior se muestra el diagrama de flujo general del programa y debajo de éste se comentan brevemente cada una de las fases.



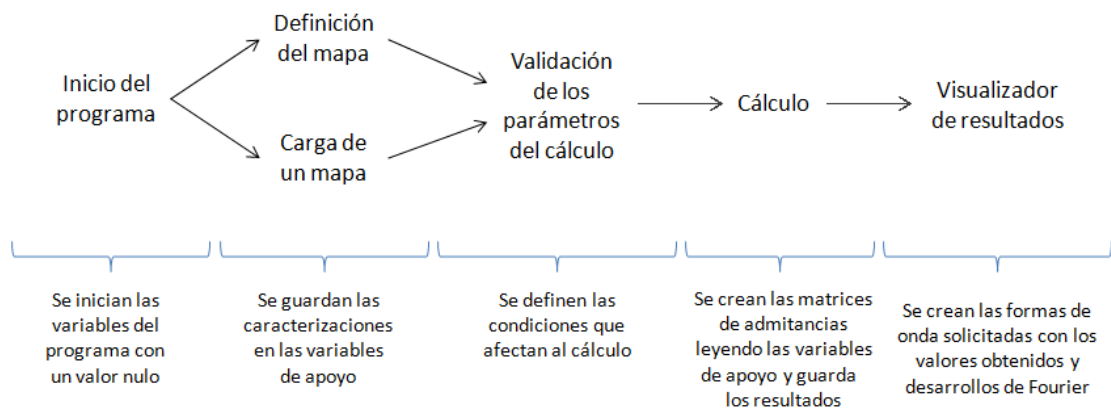


Fig. 8.17. Diagrama de flujo del programa.

La herramienta se inicia lanzando la ventana principal. Pero antes hacerla visible se generan los dos primeros grupos de variables del apartado anterior y las variables “elemento” y “cluster”. De todas estas, las variables que no podrán cambiar su valor de ninguna manera durante la ejecución de la herramienta son las variables “multiplicadores”, “numeración” y “panda”.

Para crear la variable “panda” se ha creado un algoritmo de exploración de carpetas basado en un bucle y que inicia la exploración a partir de la carpeta “PANDA”. Cuando el algoritmo encuentra un archivo de PANDA lee la categoría y subcategoría del dispositivo y almacena la dirección del archivo en una celda de datos nidificada dos veces usando como índices de la celda los números correspondientes a la categoría y subcategoría del dispositivo. En el caso de que estos números se encuentren fuera del rango esperado se almacenará la dirección al archivo como si perteneciese a una categoría adicional a las especificadas por PANDA.

Para acceder a uno de los dispositivos sería necesario usar la siguiente sentencia:

panda{Categoría,2}{Subcategoría,2}{A,B}

Donde A se corresponde con un número del uno hasta la cantidad de dispositivos con la misma categoría y subcategoría y B puede tomar como valor los números 1,2 y 3. Dependiendo del valor de B se accederá a una información u otra:

Valor de B	1	2	3
Información	A	Nombre de la carga	Dirección de la carga

Tabla 8.3. Información contenida dentro de la variable “panda”.

Seguidamente se pasaría a la caracterización del mapa de la red, durante la cual las variables de los grupos 1 a 3 mencionados en el apartado anterior irían actualizando sus valores según progresase la caracterización. Para esto es necesario que haya comunicación entre las ventanas mediante las variables del grupo 3.

El valor de la variable “elemento” se recalcula cada vez que se pulsa un botón “Definir elementos” haciendo una lectura de la variable “toggles_elementos” y se identifica cada valor lógico 1 con la pareja de nodos del elemento correspondientes. También se recalcula cuando se usa alguna opción “Nivel” de la pestaña “Definir niveles” de la barra de menús, en este caso se lanza la ventana de definir elementos como si se hubieran seleccionado todos aquellos elementos separados de la red de alimentación por un número C de elementos según la tabla:

Nivel	A	B	C	D	E	F	G
Valor de C	0	1	2	3	4	5	6

Tabla 8.4. Nivel según el número de elementos hasta la red de alimentación.

Con el valor de la variable “cluster” sucede lo mismo, se recalcula su valor usando la variable “toggles_casas” cada vez que se pulsa el botón “Definir consumidores” o usando la opción “Consumidores” dentro de la pestaña “Definir niveles”. En el último caso se lanzaría la ventana como si se hubiesen seleccionado los 80 grupos de consumidores antes de lanzarla.

En cualquier momento del proceso de caracterización el usuario es capaz de guardar el mapa de la instalación siguiendo el procedimiento explicado en el apartado 7.5. En el archivo .txt del mapa se escriben las variables poniendo el nombre de la variable en una línea, el valor o valores de la variable en las líneas de justo debajo y se deja una línea en blanco para separar una variable de otra. Las variables escritas en el archivo son: “Pbase”, “Pcons”, “fdp”, “last_armo”, “catalogo_elementos”, “habilitados”, “estado_interr”, “elementos” y “casas”. En el caso de las cuatro últimas solo se escriben las posiciones de la matriz o celda con un valor distinto al valor por defecto y el valor de esa posición. Además, en la primera línea del archivo se escribe el nombre del archivo y se deja una línea en blanco entre este y las variables para distinguirlo de otros archivos .txt.

Al pulsar el botón “Calcular” en la ventana principal se lanza una ventana desde la que podemos modificar los valores por defecto de las variables “Pcons” y “last_armo”. Igual que en otras ventanas, si en los textos editables se introducen palabras o valores incorrectos y se intenta iniciar el cálculo éste no se iniciará y, en su lugar, se lanzará una ventana



avisando del error.

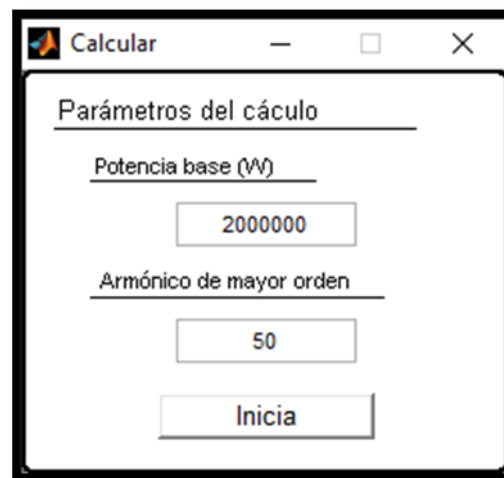


Fig. 8.18. Parámetros del cálculo.

El proceso de cálculo se divide en dos partes; la lectura del sistema y el cálculo de las matrices de admitancias y la penetración armónica. En la imagen inferior se puede ver un diagrama de flujo más detallado del proceso de cálculo.

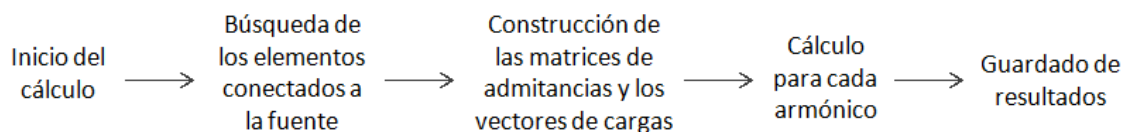


Fig. 8.18. Diagrama de flujo del cálculo.

En la primera parte se hace una lectura del estado de los interruptores de la red utilizando la matriz de la variable “habilitados” para encontrar los elementos con su interruptor cerrado y después, se forma un bucle en el que se usa la matriz de la variable “estado_interr” para saber qué elementos, de los encontrados, están conectados con la red de alimentación.

Esta búsqueda permite pasar de verse obligado a hacer los cálculos con una matriz de dimensión cercana a una 1000x1000 a hacer los mismos cálculos con una matriz de dimensión mínima. Para conseguir esta matriz de dimensión mínima se genera una matriz de dimensión igual a la de las variables “estado_interr” y “habilitados”, después se toma el nodo inferior de cada uno de los elementos con su interruptor abierto o que no estén conectados con la fuente y se elimina la fila y columna con el mismo número que este nodo inferior. Por ejemplo: Si el elemento está situado entre los nodos 3 y 5 y el nodo 5 es el inferior se eliminarán la 5ª fila y la 5ª columna.

Para compactar el código y reducir la carga del procesador se ha juntado esta redimensión de la matriz con el cálculo de la impedancia reducida de cada elemento. De esta forma, primero se crea una matriz nula de dimensión acorde a la cantidad de elementos que hayan superado la selección y después se calcula y se coloca la impedancia reducida de cada elemento en la posición que le corresponda teniendo en cuenta su conectividad con el resto de la red. Al mismo tiempo, se guardan las correspondencias entre la numeración “reducida” y la numeración original de los nodos de cada elemento dentro de la celda de la variable “correspondencias” ya que se utilizarán dentro de la ventana de resultados.

Siguiendo este procedimiento se generan a la vez las seis matrices mencionadas al presentar la variable “Matrices”. En este momento acaba la lectura del sistema.

Desde que se inicia el cálculo se ve como la ventana cambia su aspecto para informar del estado del proceso en todo momento mediante una barra de progreso y dos cuadros indicadores. Cuando se completa la lectura del sistema el cuadro superior muestra un icono de “visto” en color verde y si ha ocurrido algún fallo durante el proceso que ha hecho que se interrumpa se muestra una cruz en rojo. Sucede lo mismo con el cuadro indicador inferior y el proceso de cálculo de la penetración armónica. Si el cálculo llega a completarse la ventana se cierra automáticamente y se lanza otra ventana informando de que no han habido errores. En la imagen inferior se muestra la ventana mientras aún está haciendo el cálculo.

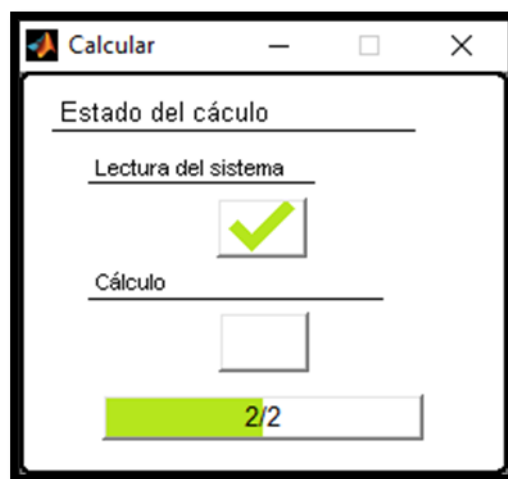


Fig. 8.20. Cálculo ejecutándose.

Al completarse la lectura del sistema se inicia una iteración que se ejecuta tantas veces como marque el valor de la variable “last_armo”. En cada ejecución se calcula la matriz de admitancias para uno de los armónicos sumando tres de las matrices de la variable “Matrices” (las matrices sumadas cambian en función de si el armónico hace que el modelo de algún elemento cambie) de forma que, si se hace referencia al orden del armónico

mediante “armónico” y a la matriz con la parte imaginaria de la impedancia de los condensadores mediante “condensadores”:

$$\text{Admitancias} = \text{resistencias} + \text{armonico} \cdot \text{reactancias} + \text{armonico}^{-1} \cdot \text{condensadores}$$

Después se calculan los elementos de la diagonal de la matriz y se sigue el cálculo según lo explicado en el apartado 6.

7.10. Visor de resultados

Esta pestaña solamente es posible lanzarla una vez se haya completado correctamente el cálculo. Para lanzarla hay que hacer lo mismo que con las ventanas de definir elementos y de definir consumidores, tiene que haber al menos un elemento o grupo de consumidores seleccionados en el mapa de la ventana principal y, entonces, se debe pulsar el botón “Ver resultados” o la opción con el mismo nombre dentro de la pestaña “Cálculo” de la barra de menús.

Se trata de una pantalla similar a la presentada en el apartado 7.3.1. En este caso en la parte derecha se ha colocado un desplegable que contiene la lista de todos los elementos que habían seleccionados en el momento de lanzar la pantalla. Debajo del desplegable se muestra la información del elemento activo y más abajo un esquema que va cambiando dependiendo del tipo del elemento activo (transformador, línea o consumidor) .

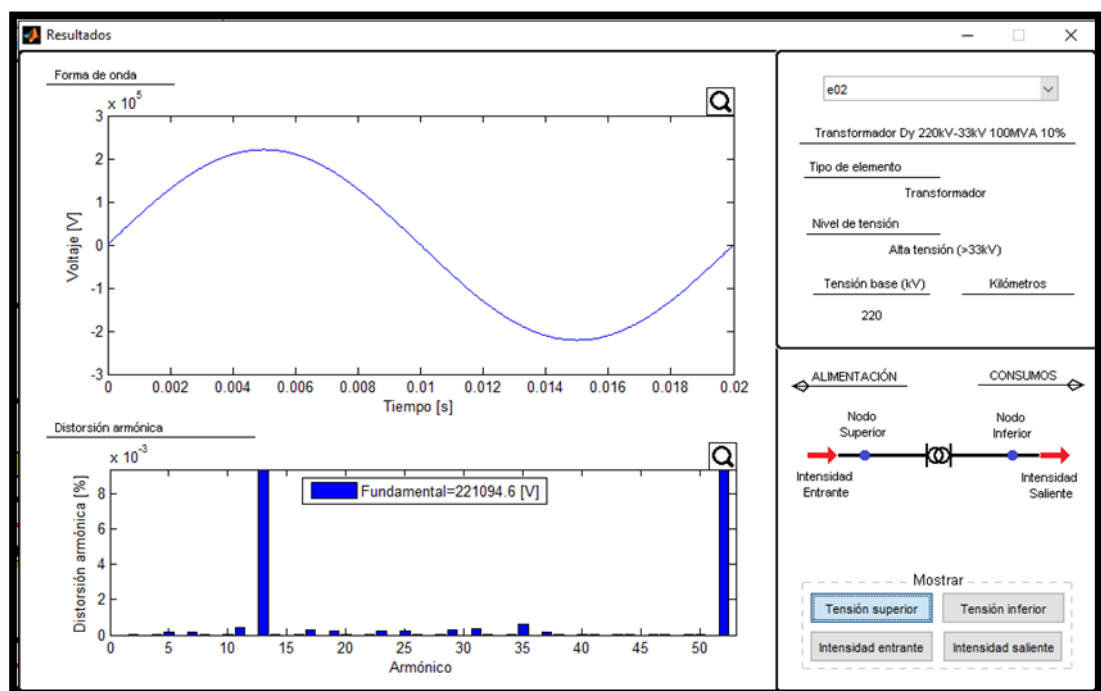


Fig. 8.21. Visor de resultados.

En este caso solamente no es posible ver gráficas de tensión y corriente superpuestas, se deben escoger la forma de onda y el espectro armónico a visualizar mediante uno de los cuatro botones: “Tensión superior”, “Intensidad entrante”, “Tensión inferior” y “Intensidad saliente”.

7.11.Manual

En este apartado se explicarán las secuencias de botones a pulsar si se desea hacer una determinada acción y otros aspectos menos evidentes del programa.

7.11.1. Lanzar la ventana de definir elementos y actualización de iconos

Para lanzar la ventana de definir elementos es necesario que en el mapa de la misma ventana en la que se pulsa el botón “Definir elementos” se haya seleccionado previamente al menos un elemento de la red. Por ejemplo, el botón “definir elementos” de la ventana principal no puede lanzar la ventana para elementos seleccionados en la ventana de definir consumidores.

Para seleccionar un elemento basta con pulsar sobre el icono del elemento hasta que la mitad del fondo del icono se muestre verde. Si una vez caracterizado el elemento se pulsa otra vez sobre su icono, éste cambiará de acuerdo a la caracterización que se haya hecho. Esto último también se puede hacer al mismo tiempo para todos los iconos de una misma ventana si se pulsa el botón “Actualizar iconos”. En la imagen se ve una representación gráfica de toda la explicación anterior.

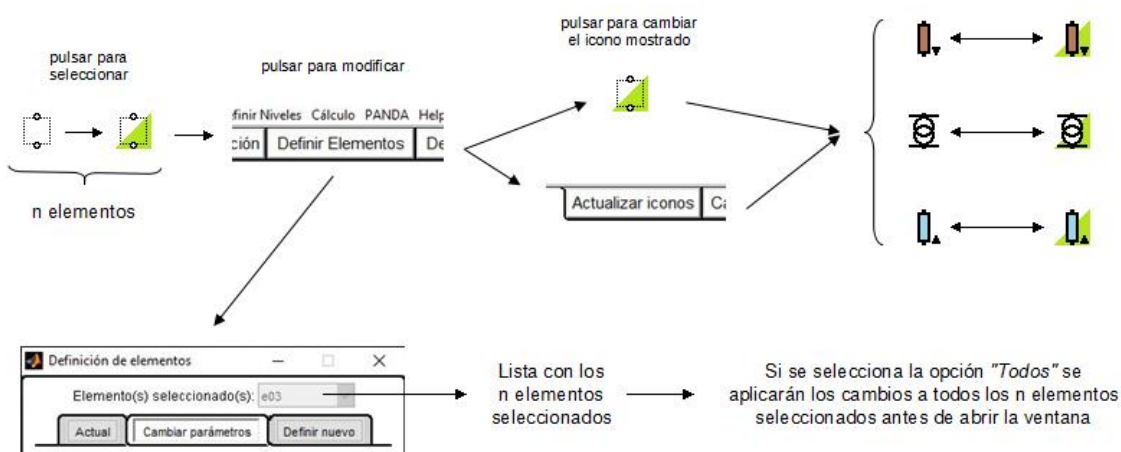


Fig. 8.22. Secuencia de botones a pulsar.

7.11.2. Copiar la especificación de un elemento

Utilizando adecuadamente la transición al cambiar el botón activo de “Actual” a cualquiera de los otros dos y usando el desplegable de la parte superior de la pantalla es posible copiar la caracterización exacta de un elemento en otro distinto.

En primer lugar, y teniendo el botón “Actual” activo, se escogerá en el desplegable aquel elemento del cual se quiere copiar la caracterización. Por ejemplo, usando la lista que figura en la imagen inferior, si se quiere copiar la caracterización del elemento e11 se seleccionará este elemento en la lista desplegable.

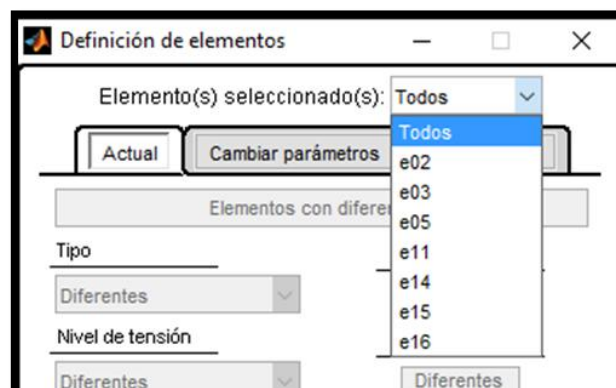


Fig. 8.23. Lista de elementos que pueden caracterizarse.

Seguidamente, se cambiará el botón activo pulsando sobre “Cambiar parámetros” si se quiere usar la caracterización tal como está o sobre “Definir nuevo” si se quiere modificar algún aspecto antes de aplicarla.

Por último se cambiará la opción escogida del desplegable y se pulsará el botón “Aplicar cambios”. Si la opción escogida es la opción “Todos” la caracterización se copiará en el resto de elementos de la lista y si la opción escogida es otro elemento la caracterización se copiará únicamente sobre ese elemento.

7.11.3. Lanzar la ventana de definición de consumidores

Para lanzar la ventana de definición de consumidores sucede lo mismo que se ha comentado en el apartado 7.11.1. Antes de pulsar el botón “Definir consumidores” es necesario que se haya seleccionado al menos uno de los 80 grupos de consumidores pulsando sobre su icono hasta que la mitad del fondo de éste se muestre verde. Una vez hecha la caracterización del grupo de consumidores si se vuelve a pulsar sobre el icono del grupo el fondo verde puede pasar a ser amarillo o puede recuperar el fondo blanco que tenía inicialmente dependiendo, respectivamente, de si se han asignado cargas no lineales a alguno de los consumidores del grupo o no. En las imágenes se ve una representación

gráfica de todo lo explicado.

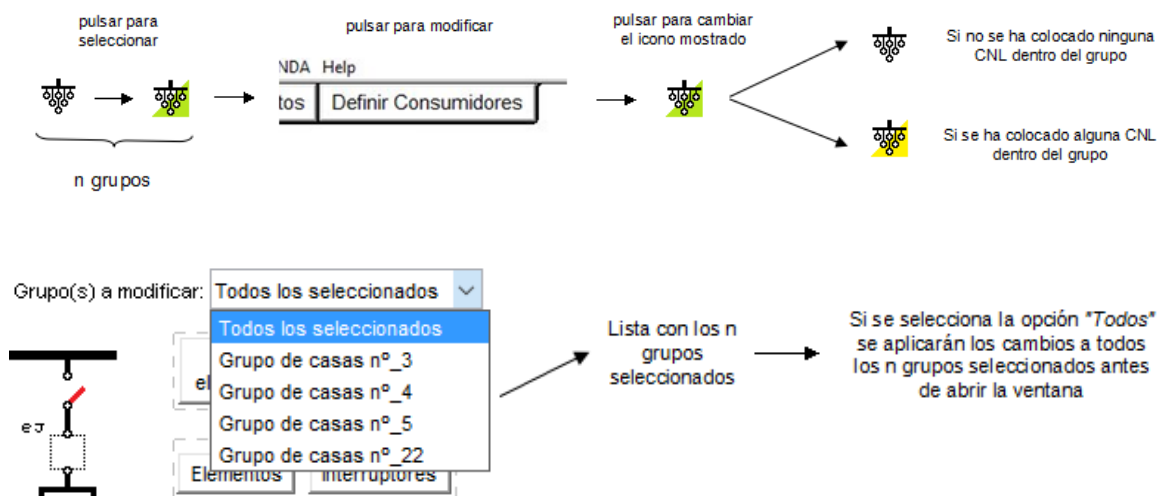


Fig. 8.24. Secuencia de botones a pulsar.

7.11.4. Comportamiento de los botones del cuadro “Resetear”

Mientras que el botón “interruptores” abre todos los interruptores del grupo de consumidores seleccionado en el desplegable de la esquina superior derecha, los otros dos botones tienen un comportamiento distinto dependiendo de si en la ventana de definir consumidores hay o no elementos seleccionados, para el botón “elementos”, y si hay o no consumos no lineales seleccionados para el botón “C. No lineales”.

- Si hay alguno seleccionado al pulsar el botón se eliminan los datos (caracterización del elemento o conjunto de cargas no lineales) asociados a los iconos seleccionados para el grupo de consumidores que muestre el desplegable.
- Si no hay ninguno seleccionado se borran los datos asociados a todos el grupo de consumidores que muestre el desplegable. Todas las caracterizaciones de elementos se eliminan y todos los conjuntos de cargas no lineales se borran, respectivamente.

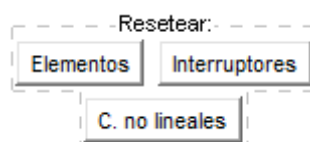


Fig. 8.25. Cuadro “Resetear”.

7.11.5. Indicaciones sobre la parte inferior de la ventana de definir consumidores

Por una parte, los botones y desplegables bajo el título “Asignar cargas a consumidores” actúan únicamente sobre los consumidores cuyos iconos de cargas no lineales (tiristores) estén seleccionados.

Por otra, los botones, textos y desplegable bajo el título “Ver cargas asignadas” muestran las cargas no lineales que tienen en común todos los consumidores cuyos iconos de cargas no lineales estén seleccionados. En la imagen inferior no se muestra ninguna carga debido a que los consumidores colocados en las ramas A,C, H e I no tienen ninguna carga no lineal en común.

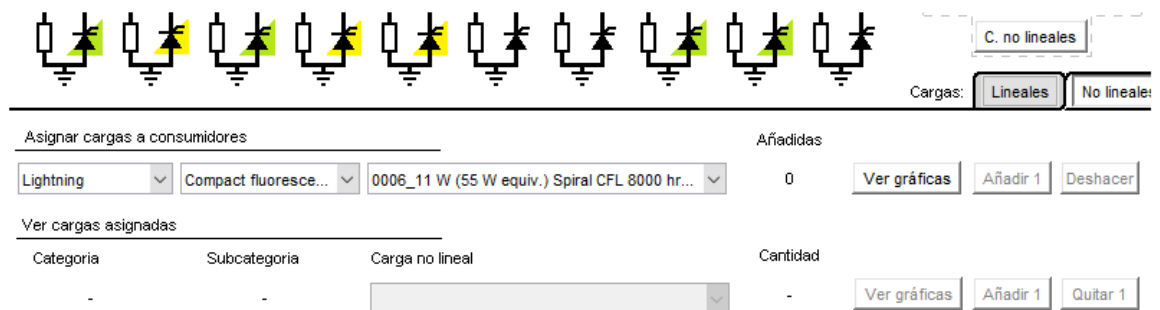


Fig. 8.26. Parte inferior de la pantalla.

8. Ejemplo de aplicación

8.1. Condiciones del ejemplo

8.1.1. Localización escogida

El ejemplo modelizará el barrio de Santa Eulàlia en l'Hospitalet de Llobregat. Este barrio limita al este con la ciudad de Barcelona , con la que comparte la calle de la Riera Blanca, al norte con el barrio de la Torrassa , al oeste con los barrios de San José y Centro , y al sur con el Gornal , y el Distrito Económico. Tiene unos 40.000 habitantes repartidos en poco más de 18.000 viviendas para un área de 1,63 km². En el mapa inferior se ha delimitado el barrio y se han señalado diferentes colegios de primaria y secundaria, áreas comerciales, centros deportivos, una estación de mantenimiento del metro y edificios gestionados por el ayuntamiento que tienen un mayor número de lámparas que cualquier vivienda.

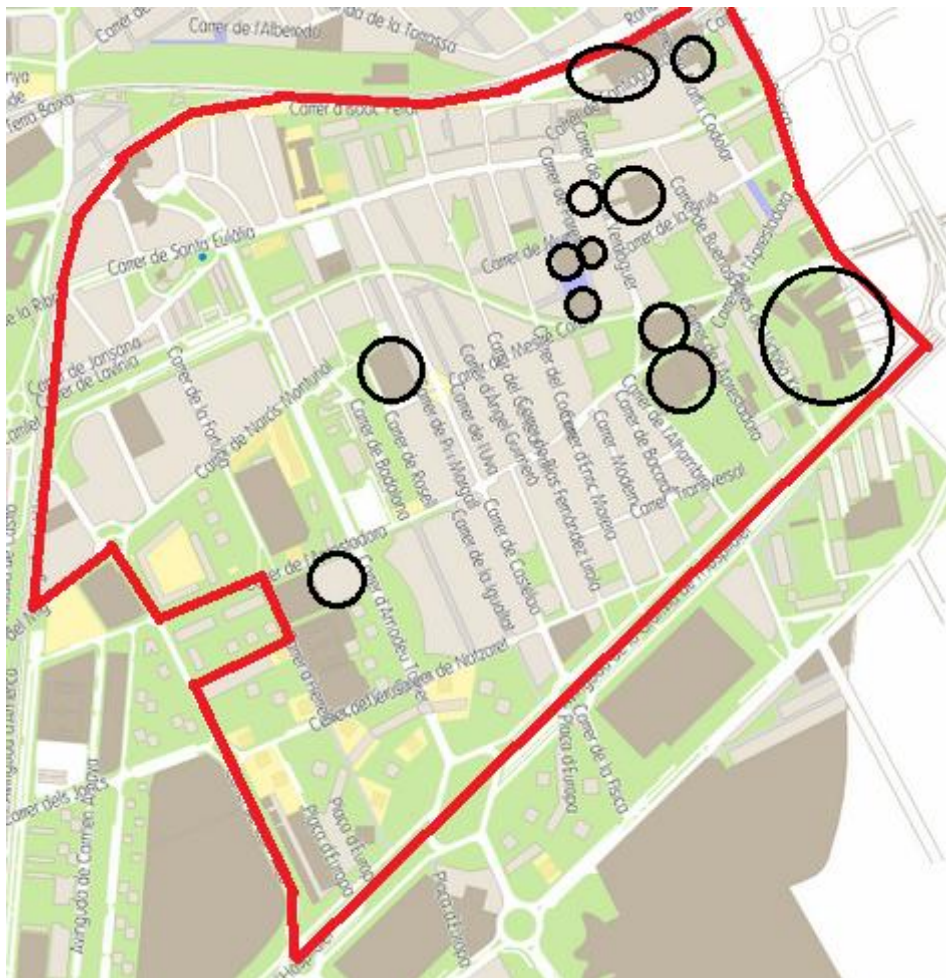


Fig. 9.1. Mapa del barrio.

Comparando la imagen anterior con el mapa de la red que utiliza el programa se verían las correspondencias entre sectores y embarrados de forma que:

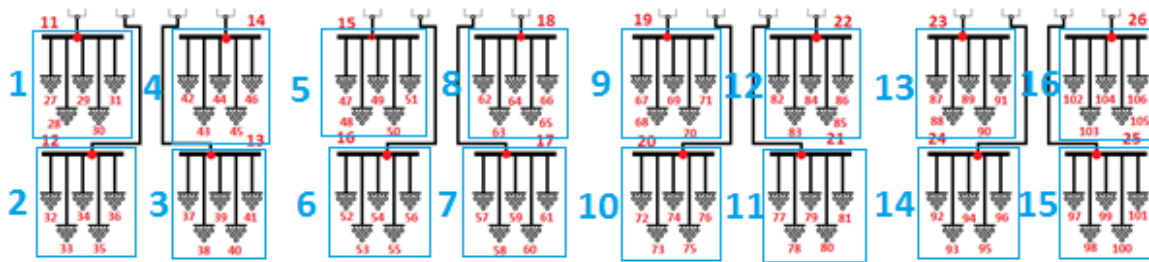


Fig. 9.3. Sectores sobre el esquema del programa

De esta manera, por cada división se dispondrá de 5 embarrados de los que cuelgan 10 consumidores en cada uno, un total de 50 consumidores.

8.1.2. Consumidores

Debido a que el número de viviendas excede al número máximo de consumidores que puede manejar el programa se optará por considerar cada edificio como un consumidor. De esta forma, se le asignará un consumo lineal y una cantidad de cargas no lineales mayor cuantas más plantas tenga, a razón de 4,5kW de potencia activa trifásica, 45 lámparas, 3 ordenadores, 3 monitores de 17", 3 impresoras, 1 tablet, 3 neveras, 3 cocinas de inducción, 3 hornos microondas y 3 por planta. Es decir, a un edificio de 4 plantas le

Los emplazamientos marcados en el mapa del apartado 8.1.1 serán considerados como consumidores independientes del edificio al que pertenezcan, de forma que su potencia activa se estimará en función de la dimensión y de la actividad que se desarrolle en el lugar y su número de cargas no lineales de tipo lámpara será mayor que en las plantas de los bloques de pisos. La forma de incorporar cada emplazamiento será:

- Estación de servicio de metro: 4 consumidores con 100 kW y 150 lámparas cada uno.
- Escuela primaria: 1 consumidor con 45 kW y 100 lámparas.
- Escuela secundaria y bachillerato: 1 consumidor con 60 kW y 125 lámparas.
- Ciudad de la justicia: 9 consumidores como edificios de 13 plantas con 7,5 kW y 80 lámparas cada una.
- Mercado municipal: 1 consumidor con 70 kW y 160 lámparas.
- Polideportivo: 1 consumidor con 125 kW y 220 lámparas.

- Ambulatorio // CAP: 1 consumidor con 30 kW y 80 lámparas.

Y los consumidores en cada sector serán los siguientes:

- Sector 1: 9 edificios de 7 plantas, 15 edificios de 9 plantas, 3 edificios de 11 plantas, 3 edificios de 12 plantas, 7 edificios de 13 plantas y 13 edificios de 14 plantas
- Sector 2: 22 edificios de 3 plantas y 6 edificios de 4 plantas.
- Sector 3: 10 edificios de 4 plantas, 3 edificios de 5 plantas, 12 edificios de 7 plantas y ambulatorio.
- Sector 4: 12 edificios de 1 plantas, 9 edificios de 3 plantas, 5 edificios de 12 plantas, 2 edificios de 15 plantas, 1 edificios de 18 plantas, 1 edificios de 22 plantas y 1 edificio de 27 plantas.
- Sector 5: 32 edificios de 2 plantas, 10 edificios de 6 plantas, 3 edificios de 7 plantas y 5 edificios de 9 plantas.
- Sector 6: 43 edificios de 7 plantas, 2 edificios de 10 plantas, 3 edificios de 12 plantas y 1 edificios de 13 plantas y escuela primaria.
- Sector 7: 50 edificios de 8 plantas
- Sector 8: 48 edificios de 8 plantas, 1 edificio de 10 plantas y 1 edificio de 20 plantas.
- Sector 9: 32 edificios de 2 plantas, 4 edificios de 3 plantas, 2 edificios de 4 plantas, 1 edificios de 6 plantas, 8 edificios de 8 plantas.
- Sector 10: 28 edificios de 5 plantas, 6 edificios de 6 plantas, 4 edificios de 7 plantas, 8 edificios de 8 plantas, mercado municipal, escuela primaria, escuela secundaria y de bachillerato, ambulatorio.
- Sector 11: 37 edificios de 4 plantas, 3 edificios de 5 plantas y 10 edificios de 6 plantas
- Sector 12: 44 edificios de 3 plantas y 6 edificios de 6 plantas
- Sector 13: 10 edificios de 4 plantas, 8 edificios de 5 plantas, 6 edificios de 6 plantas, 4 edificios de 8 plantas, 7 edificios de 12 plantas y estación de servicio de metro
- Sector 14: 4 edificios de 3 plantas, 18 edificios de 4 plantas, 9 edificios de 5 plantas, 5 edificios de 6 plantas, 8 edificios de 7 plantas, 3 edificios de 8 plantas, polideportivo y escuela primaria,.

- Sector 15: 8 edificios de 8 plantas, 9 edificios de 14 plantas, Ciudad de la justicia y una escuela secundaria y de bachillerato.
- Sector 16: 14 edificios de 4 plantas, 2 edificios de 5 plantas, 9 edificios de 6 plantas, 1 edificios de 7 plantas, 12 edificios de 8 plantas, 3 edificios de 10 plantas, 3 edificios de 12 plantas, 2 edificios de 14 plantas y una escuela primaria.

8.1.3. Elementos de la red

El barrio se abastece eléctricamente desde diferentes puntos o subestaciones fuera de éste de forma que es imposible saber qué edificios se alimentan con el mismo cable. Por tanto, siguiendo el mapa del programa, se seguirá la equivalencia entre sectores y embarrados explicada anteriormente.

Según el mapa de red eléctrica española, hay un cable distribuidor a 220 kV que debería cruzar el barrio, o pasar muy cerca de éste, para irse a encontrar con otros dos tramos iguales en algún sitio entre Montjuïc y la plaza Cerdá. Aprovechando este hecho, se optará por considerar todo el tramo (cables y transformadores) desde el cable distribuidor a 220 kV hasta el cable de baja tensión que llega a cada edificio.



Fig. 9.4. Líneas de alta tensión de 220 kV (verde) y 400 kV (azul)

Se usarán tres estaciones de transformación de tipo triángulo-estrella: una de 220 kV a 33 kV; otra de 33 kV a 11 kV y una última de 11 kV a 400 V; unidas por líneas aéreas de 2 y 0,5

km. De la última estación saldrán cables subterráneos de 250 m a cada consumidor del embarrado.

8.2. Resultados

Al ejecutar la simulación con la configuración explicada anteriormente se han obtenido las siguientes tensiones fundamentales, en pu, para cada nodo del sistema:

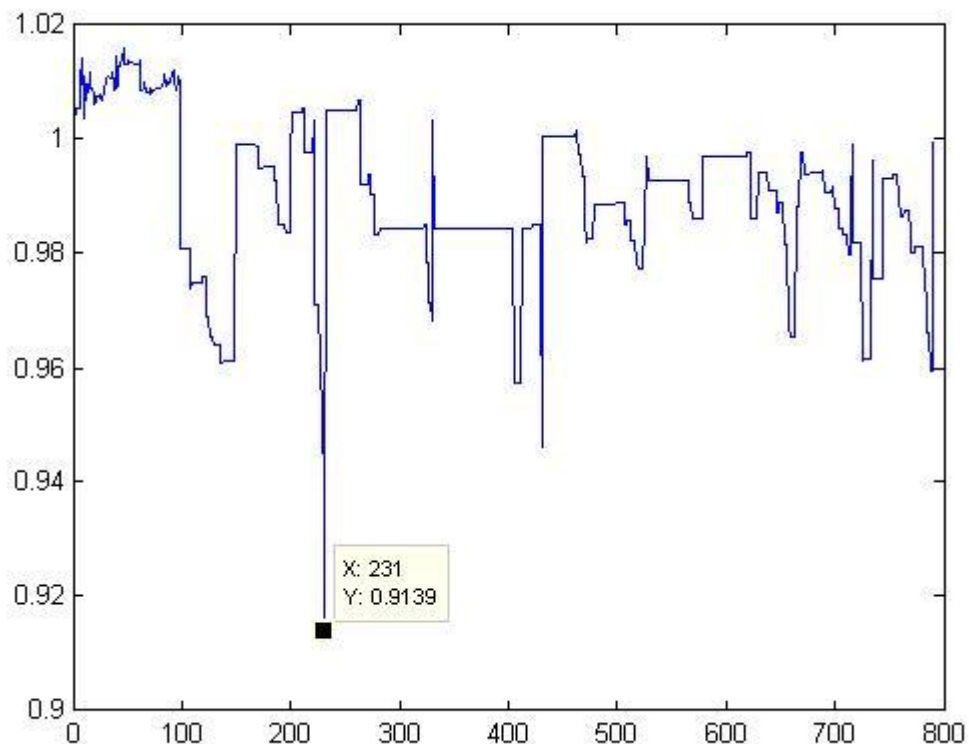


Fig. 9.5. Tensiones nodales en pu.

Los nodos de la red tienen la numeración más baja (del 1 al 106) siendo el nodo 1 el que corresponde a la alimentación y los nodos con numeración más alta los que corresponden a los consumidores (del 107 en adelante). Las tensiones más bajas corresponden a las ramas menos cargadas del mapa y la tensión más baja corresponde al consumidor del nodo 231. Este consumidor es el ambulatorio del sector 3 y su tensión se explica por el hecho de que es un consumo con una carga muy pequeña y el resto de consumidores del embarrado (5 edificios de 6 plantas) tampoco suponen una carga suficientemente mayor a la de los elementos de la red que conectan el consumidor con la alimentación. El resto de tensiones bajas se dan por el mismo hecho explicado anteriormente, se dan en consumidores que pertenecen a sectores con menos carga y conectan en embarrados de los que cuelgan menos de 10 consumos.

Debido a que la red usada por el programa no dispone de más mecanismos de eliminación de armónicos que la cancelación entre algunos de éstos cuando se juntan en un embarrado y el bloqueo de los múltiplos de 3 mediante los transformadores triángulo-estrella se observa una distorsión armónica por encima de los límites que estipulan los estándares propuestos por el IEEE:

Voltage Distortion Limits		
Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
Below 69 kV	3.0	5.0
69 kV to 161 kV	1.5	2.5
161 kV and above	1.0	1.5
NOTE: High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user.		

Fig. 9.6. Límites de distorsión de voltaje según el IEEE

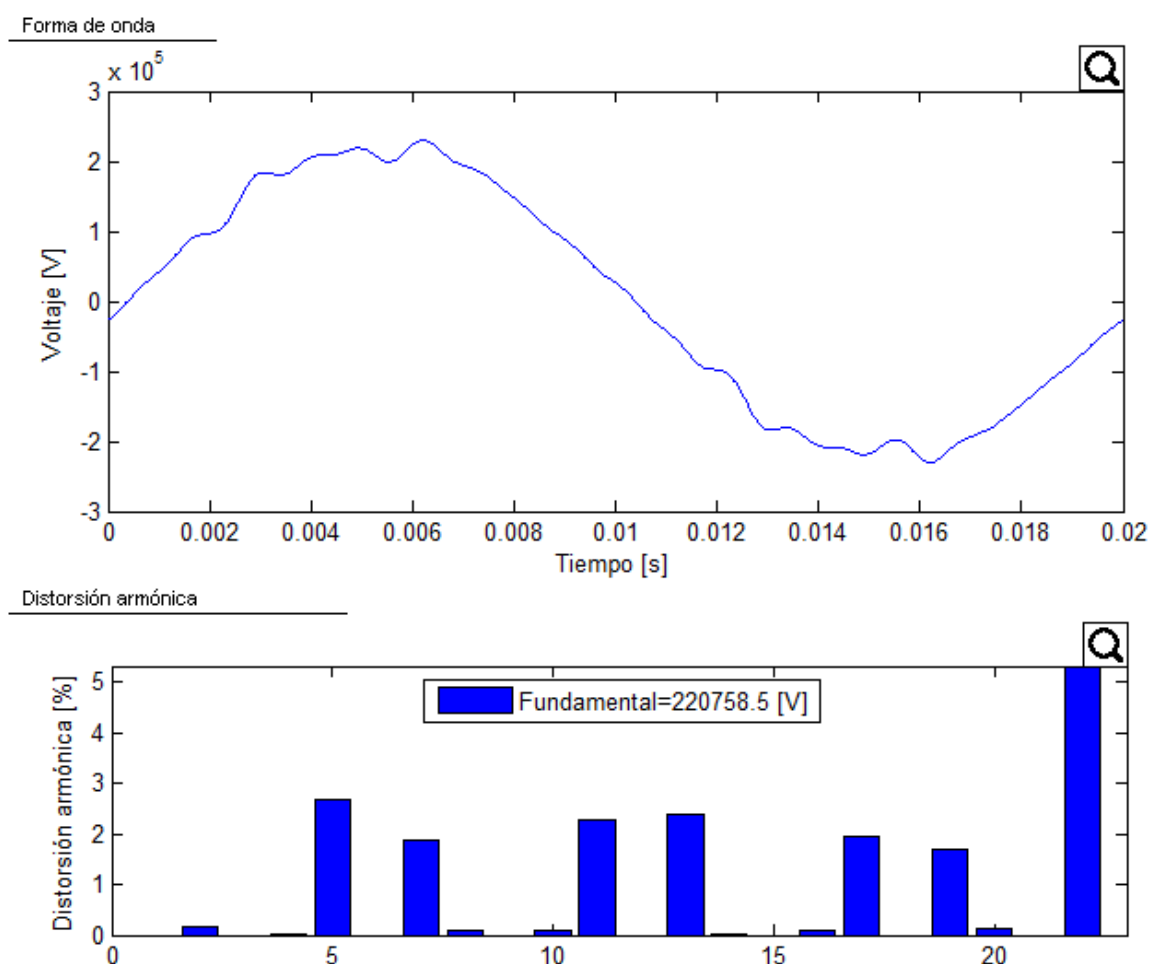


Fig. 9.7. Tensión y tasas de distorsión en el nodo de la red de alimentación.

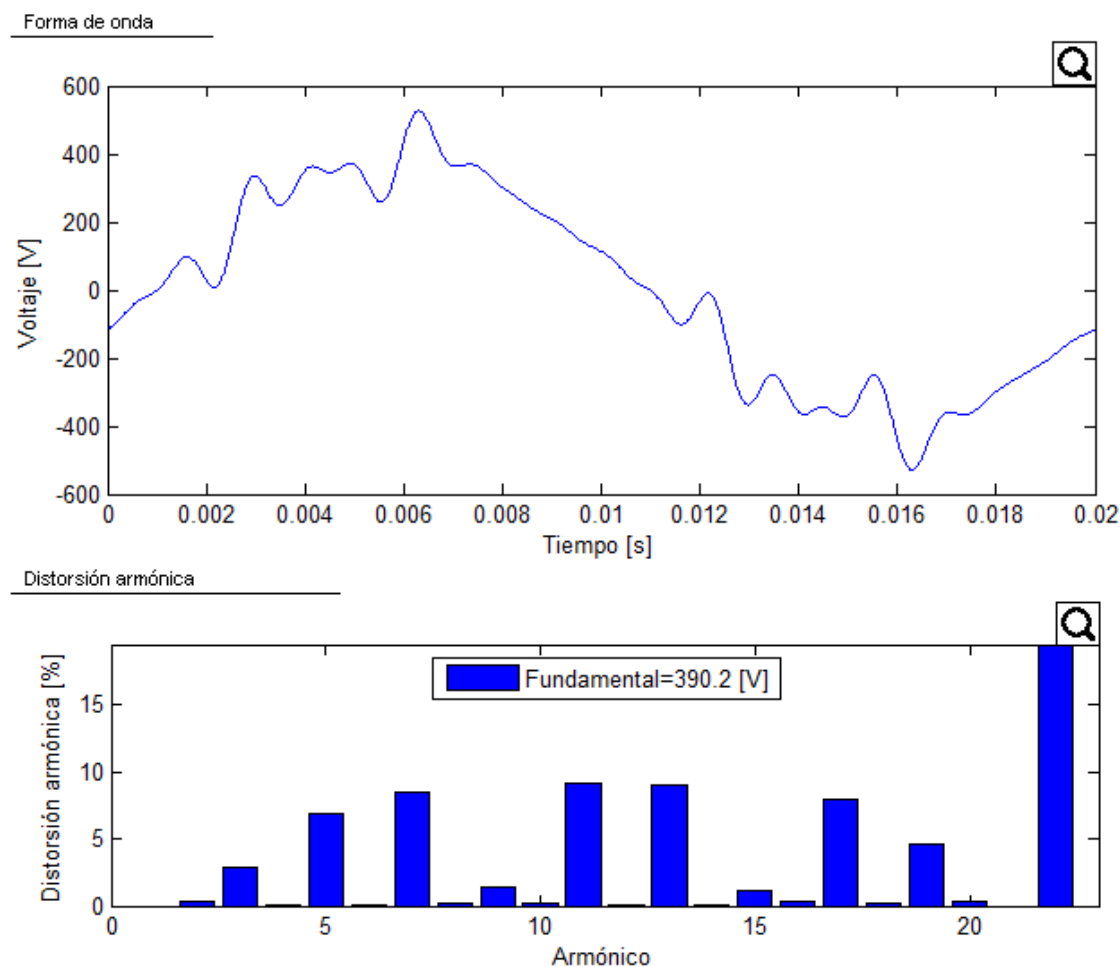


Fig. 9.8. Tensión y tasas de distorsión en un nodo de la ciudad de la justicia.

9. Estudio económico e impacto medioambiental

9.1. Planificación temporal y evaluación económica

Se ha dividido el proyecto en tareas más pequeñas y se han organizado temporalmente por meses según se han ido realizando.

09-15	10-15	11-15	12-15	01-16	02-16	03-16	04-16	
								Lectura de PANDA
								Motor de cálculo
								Verificación del motor de cálculo
								Ventana principal
								Modificación del motor de cálculo
								Definición de consumidores
								Definición de elementos
								Guardado y Carga
								Iconos y fondos
								Verificación de la herramienta
								Visor de resultados
								Explorador de PANDA
								Redacción
								Corrección de errores

Fig. 10.1. Programación.

Para calcular el coste del proyecto se tendrán en cuenta todos los aspectos materiales implicados en su realización así como el tiempo invertido por el autor, empezando a contar desde el mes de septiembre de 2015. Para cuantificar el valor del tiempo invertido por el autor se tratará el proyecto como un convenio de prácticas a media jornada (4 h/día, 5 días/semana) con una remuneración de 7€/h. En la siguiente tabla se muestra el desglose de costes del proyecto.

Concepto	Coste/hora o amortización	Coste
Trabajador	7 €/h	4900 €
Ordenador portátil	230 €/año	155 €
Matlab	400 €/año	270 €
Editor de textos	0	0

(versión de prueba)		
Suma		5325
IVA	21%	1118,25 €
Coste final		6443,25 €

Tabla 10.1. Costes.

9.2. Impacto medioambiental del proyecto

Puesto que el proyecto no supone una actuación directa sobre el medioambiente no hay un impacto directo sobre éste. No obstante, la distribución de energía eléctrica afecta al medioambiente de diferentes maneras:

- Es necesario intervenir sobre el medioambiente para construir toda la red de distribución y para ello se modifica el medio natural edificando torres eléctricas y instalaciones transformadoras además de las correspondientes medidas de seguridad y las rutas de acceso para su mantenimiento. Esto modifica el paisaje y puede implicar la eliminación de la vegetación en las inmediaciones de la zona intervenida.
- En el aspecto acústico se destacan todas aquellas instalaciones transformadoras por ser una gran fuente de contaminación acústica. Por este motivo, en general, se sitúan lejos de zonas residenciales y se construyen con fuertes aislantes.
- Por otra parte, una red mal dimensionada implica unas pérdidas energéticas muy grandes durante el transporte de la energía. Esto supone un aumento en las necesidades productivas de los centros generadores, lo que implica un aumento en la contaminación atmosférica ya que al menos un tercio de la energía consumida en España proviene de centrales que generan energía mediante el uso de combustibles fósiles.
- Tal como se ha dicho anteriormente en el trabajo, una red con mucho contenido armónico hará que sus componentes tengan una esperanza de vida menor. Un aumento en la frecuencia de sustitución de los componentes de la red implica un aumento en la demanda de estos componentes y, por tanto, un aumento en las necesidades energéticas para fabricarlos.

- Para finalizar, un accidente o fallo en alguno de los componentes de la red habitualmente tiene consecuencias mortales si hay personas o animales implicados.

Conclusiones

Mediante los apartados iniciales se ha conseguido definir y explicar qué se entiende cuando se hace referencia al contenido armónico de un señal y qué supone la contaminación armónica para los elementos de una red de distribución.

A continuación se ha detallado el método de cálculo realizado, con sus ventajas y sus inconvenientes.

Finalmente se ha logrado elaborar una herramienta informática rápida que da utilidad a la base de PANDA fuera de su web oficial y que permite personalizar una red de suministro eléctrico y a sus consumidores para después calcular el contenido armónico en la red mediante el método de la penetración armónica.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Mesas, J.J., *Estudio y caracterización de cargas no lineales*. Tesis doctoral. Barcelona, 2009.
- [2] Neville, R. Watson, *Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps*. IEEE transactions on power delivery, vol 24, no 3. Julio 2009. Artículo de revista.
- [3] Oriol, J.M., *Desenvolupament d'una aplicació per a l'estudi de conceptes d'electrotècnia*. Trabajo de final de carrera. Barcelona, 2005.
- [4] Siemens CO., *Harmonics in power systems: causes effects and control*. Mayo 2013. Documento informativo.
- [5] Pedra, J., *Circuitos monofásicos y trifásicos*. Edicions UPC, Colección Politext. Barcelona, 1993.
- [6] Gómez Expósito, A, Conejo, A.J., Cañizares, C., *Electric energy systems : analysis and operation*. Boca Ratón: CRC Press, cop. 2009.
- [7] Córcoles, F., Pedra, J., Salichs, M., *Transformadores*. Edicions UPC, Colección Politext. Barcelona, 2004.
- [8] TRAMAQ CO., *Transformadores secos encapsulados*. Buenos Aires, 2004/2005. Catálogo de transformadores.
- [9] Herraiz, S., *Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas*. Tesis doctoral. Barcelona, 2002.

Agradecimientos

En primer lugar deseo agradecer a Luís Sainz su paciencia, dedicación y entrega tanto con este trabajo como con sus alumnos.

En segundo lugar quiero agradecer a todos los compañeros que he ido conociendo durante el transcurso del grado por su amistad y su compañerismo.

Y por último, pero no menos importante, a mi familia y amigos por el apoyo que me brindan.